

## Trabajo Fin de Grado

### **Análisis de la influencia de la inyección en las propiedades de transmisión de fibras de plástico de gradiente de índice (GI-POF)**

Analysis of the impact of launching conditions on transmission properties of Graded Index Plastic Optical Fibers (GI-POFs)

Autora

**Nuria Villar Mas**

Directora

M<sup>a</sup> Ángeles Losada Binué

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020

# ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA INYECCIÓN EN LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE FIBRAS DE PLÁSTICO DE GRADIENTE DE ÍNDICE (GI-POF)

## Resumen

La finalidad del proyecto desarrollado en esta memoria es avanzar en la aplicación de la tecnología asociada a las fibras ópticas de plástico en redes de comunicaciones de corto alcance como parte de investigación del equipo de trabajo de POF (*Plastic Optical Fiber*) del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del I3A. El eje central del trabajo es la caracterización completa de las propiedades de transmisión de la fibra de PMMA de 1 mm de núcleo y perfil de gradiente de índice en función de la longitud, así como el análisis de la influencia de la inyección.

Antes de realizar la caracterización de la GI-POF (fibra de plástico de gradiente de índice) se realiza un estudio previo para determinar la potencia de saturación y el factor de conversión del detector con el que se va a trabajar. Después, se realizan las medidas del protocolo definido para la caracterización de las fuentes ópticas para determinar cuál es la más adecuada para cada uno de los experimentos planificados. Estas medidas son: el parámetro S21, la distorsión armónica y la distribución espacial de intensidad. De esta forma, para las medidas con longitudes de fibra largas, seleccionamos aquella fuente que presenta mayor potencia de emisión y admite la posibilidad de modular con mayores potencias de RF.

Para llevar a cabo la caracterización completa de la GI-POF, se define un protocolo experimental basado en el método de corte que permite analizar las propiedades de la fibra sin influencia de la inyección. Los resultados muestran que la respuesta en frecuencia se degrada conforme aumenta la longitud, pero de manera mucho más lenta que en las fibras de salto de índice. Por otra parte, la anchura de la distribución de intensidad a la salida de la fibra no depende prácticamente de su longitud, sino que viene dada principalmente por cómo son las terminaciones de la fibra en los dos extremos, lo que es muy diferente de la SI-POF (fibra de plástico de salto de índice). Además, los resultados de las medidas del BER (*Bit Error Rate*) en función de la tasa de bit han permitido confirmar que el efecto predominante en la degradación de la transmisión con GI-POF es la atenuación más que la dispersión.

Para concluir el trabajo se estudia la influencia de las condiciones de inyección mediante la comparación de las respuestas en frecuencia y las distribuciones de intensidad con inyección directa, con inyección a través de un rabillo de fibra SI-POF (más ancha y difusa), y con pulido de los extremos. Los resultados indican que cuando la luz entra en la fibra con una mayor directividad la respuesta frecuencial se degrada, y que la inyección a través del rabillo produce una distribución de intensidad más ancha a la salida de la fibra y una mejor respuesta en frecuencia, reduciendo considerablemente su variabilidad.

# Índice de contenidos

<b>CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN.....	6
1.2. OBJETIVOS.....	7
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	8
 <b>CAPÍTULO 2 : FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO.....</b>	 <b>9</b>
2.1. PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN: ATENUACIÓN, DISPERSIÓN .....	9
 <b>CAPÍTULO 3 : CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ACTIVOS.....</b>	 <b>14</b>
3.1. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DE SATURACIÓN Y FACTOR DE CONVERSIÓN DEL SPD-2 .....	14
3.2. CARACTERIZACIÓN DE FUENTES ÓPTICAS .....	16
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO .....	29
3.4. CONCLUSIONES .....	33
 <b>CAPÍTULO 4 : ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE LA GI-POF .....</b>	 <b>34</b>
4.1. PROTOCOLO EXPERIMENTAL .....	34
4.2. RESULTADOS .....	36
4.3. EXPERIMENTO DE CONTROL.....	44
4.4. CONCLUSIONES .....	45
 <b>CAPÍTULO 5 : INFLUENCIA DE LA INYECCIÓN EN LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA GI-POF .....</b>	 <b>46</b>
5.1. CARACTERIZACIÓN CON INYECCIÓN DIRECTA.....	46
5.2. CARACTERIZACIÓN INYECTANDO CON UN RABILLO CORTO DE FIBRA SI-POF .....	48
5.3. MEDIDAS SIMULTÁNEAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD.....	50
5.4. INFLUENCIA DEL PULIDO EN LOS EXTREMOS DE LA FIBRA .....	51
5.5. CONCLUSIONES .....	52
 <b>CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	 <b>53</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	53
6.2. LÍNEAS FUTURAS .....	54

<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO I. PREPARACIÓN DE LOS EXTREMOS DE POF .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO II. MEDIDA DE LA ATENUACIÓN ESPECTRAL .....</b>	<b>60</b>
II.1    SISTEMA EXPERIMENTAL .....	60
II.2    PROTOCOLO DE MEDIDA .....	60
II.3    COMPARACIÓN CON OTRAS FIBRAS .....	61
<b>ANEXO III. SOFTWARE UTILIZADO.....</b>	<b>62</b>
III.1    RESPUESTAS FRECUENCIALES .....	62
III.2    CAMPO LEJANO.....	63
III.3    BER.....	64
<b>ANEXO IV. DISTORSIÓN DE LAS SINUSOIDES .....</b>	<b>66</b>
IV.1    LD7 .....	66
(a) <i>Intensidad de polarización: 25 mA</i> .....	66
(i)    Variación de frecuencia .....	66
(ii)   Variación de potencia .....	68
(b) <i>Intensidad de polarización: 30 mA</i> .....	70
(i)    Variación de frecuencia .....	70
(ii)   Variación de potencia .....	72
IV.2    VL .....	73
(i)    Variación de frecuencia .....	73
(ii)   Variación de potencia .....	75
<b>ANEXO V. MANUALES Y HOJAS DE CARACTERÍSTICAS .....</b>	<b>76</b>



# Índice de Figuras y Tablas

<b>FIGURA 2.1:</b> ATENUACIÓN ESPECTRAL DE DIFERENTES FIBRAS: PMMA-POF, PF-POF, PCS Y GOF [14].	11
<b>FIGURA 2.2:</b> COMPARACIÓN DE LA ATENUACIÓN DE LA SI-POF DE PMMA CON OMGIGA [1].	11
<b>FIGURA 2.3:</b> DISPERSIÓN TEMPORAL EN UNA POF [13]	12
<b>FIGURA 2.4:</b> DEFINICIÓN DE ANCHO DE BANDA DE LA POF [1].	12
<b>FIGURA 2.5:</b> FIBRA DE ÍNDICE GRADUAL (ARRIBA). FIBRA DE SALTO DE ÍNDICE (ABAJO)	13
<b>FIGURA 2.6:</b> COMPARACIÓN DE ANCHOS DE BANDA POR DISTANCIA DE DISTINTOS TIPOS DE FIBRA [14].	13
<b>FIGURA 3.1:</b> ESQUEMA DEL SISTEMA EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA MEDIR POTENCIA ÓPTICA (1) Y VOLTAJE (2).	15
<b>FIGURA 3.2:</b> VOLTAJE DE SALIDA EN FUNCIÓN DE POTENCIA ÓPTICA PARA VARIAS FIBRAS. RECTAS AJUSTADAS.	15
<b>FIGURA 3.3:</b> POTENCIA EN FUNCIÓN DE INTENSIDAD Y TEMPERATURA PARA LD7 (IZQUIERDA) Y LD40 (DERECHA)	18
<b>TABLA 3.1:</b> RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ÍTH Y PENDIENTE PARA LAS TRES TEMPERATURAS DE TRABAJO.	18
<b>FIGURA 3.4:</b> ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA UTILIZADO PARA MEDIR LA RESPUESTA FRECUENCIAL DE LA FIBRA.	19
<b>FIGURA 3.5:</b> RESPUESTA FRECUENCIAL DEL LD7 PARA DISTINTAS TEMPERATURAS E INTENSIDADES DE POLARIZACIÓN.	20
<b>FIGURA 3.6:</b> RESPUESTA FRECUENCIAL DEL LD40 PARA DISTINTAS TEMPERATURAS E INTENSIDADES DE POLARIZACIÓN.	21
<b>FIGURA 3.7:</b> RESPUESTA FRECUENCIAL DEL VL670 DE GRAVITON	21
<b>FIGURA 3.8:</b> RESPUESTA FRECUENCIAL ÓPTIMA DE CADA FUENTE	22
<b>FIGURA 3.9:</b> ESQUEMÁTICO DEL ESCENARIO PARA LA TOMA DE MEDIDAS DE THD.	23
<b>FIGURA 3.10:</b> DISTORSIÓN DE LAS SINUSOIDES PARA 100 MHz	24
<b>FIGURA 3.11:</b> DISTORSIÓN DE SINUSOIDES PARA 25 MA Y DISTINTAS POTENCIAS RF, CON 100 MHz (IZQUIERDA) Y 1 GHz (DERECHA)	24
<b>FIGURA 3.12:</b> THD DEL LD7 EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA (IZQUIERDA) Y EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA RF (DERECHA)	25
<b>FIGURA 3.13:</b> THD DEL VL EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA (IZQUIERDA) Y EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA RF (DERECHA)	26
<b>FIGURA 3.14:</b> ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA MEDIR PATRONES DE CAMPO LEJANO [10].	27
<b>FIGURA 3.15:</b> PERFIL RADIAL GI-POF CON LD7 (IZQUIERDA) Y VL (DERECHA)	28
<b>FIGURA 3.16:</b> EAF GI-POF TRAMOS DE 1 METRO CON LD7 (IZQUIERDA) Y VL (DERECHA)	28
<b>FIGURA 3.17:</b> COMPARACIÓN DE EAF PARA LD7 (IZQUIERDA) Y VL (DERECHA)	29
<b>FIGURA 3.18:</b> DIAGRAMA DE OJO A LA SALIDA DEL OPTOBERT.	30
<b>FIGURA 3.19:</b> BARRIDO EN TASA DE BIT CON LD7 (IZQUIERDA) Y VL (DERECHA)	30
<b>TABLA 3.2:</b> DIAGRAMAS DE OJO DEL SISTEMA CON LD7 Y VL	31
<b>FIGURA 3.20:</b> BER FRENTE A POTENCIA ÓPTICA RECIBIDA EMITIENDO CON EL LD7 (IZQUIERDA) Y VL (DERECHA)	32
<b>FIGURA 4.1:</b> COMPARACIÓN DE S21 Y RESPUESTA FRECUENCIAL PARA 115 M CON LD7 Y VL	35
<b>FIGURA 4.2:</b> POTENCIA ÓPTICA EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD.	37
<b>FIGURA 4.3:</b> S21 (IZQUIERDA) Y H(F) (DERECHA) DE LAS DISTINTAS LONGITUDES DEL CUT-BACK	38
<b>FIGURA 4.4:</b> COMPARACIÓN GI-BH (IZQUIERDA) Y GI-GH (DERECHA)	38
<b>FIGURA 4.5:</b> COMPARACIÓN DE ANCHOS DE BANDA DE GI-POF Y SI-POF EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD.	39
<b>FIGURA 4.6:</b> DISTRIBUCIONES DE INTENSIDAD (IZQUIERDA) Y EAF (DERECHA) DE LA SERIE DE CORTE.	40
<b>FIGURA 4.7:</b> MEDIA Y DESVIACIÓN TÍPICA DE LA SERIE DE CORTE Y SERIE DE TRAMOS DE 1 METRO	40
<b>FIGURA 4.8:</b> COMPARACIÓN DE GI-POF CON SI-POF MEDIANTE EAF	41
<b>FIGURA 4.9:</b> BER EN FUNCIÓN DE TASA DE BIT EMITIENDO CON LD7	42
<b>FIGURA 4.10:</b> TASA PARA BER FIJO	42

<b>FIGURA 4.11:</b> DIAGRAMA DE OJO PARA 300 MHZ EN 50 M (IZQUIERDA) Y 65 M (DERECHA) .....	43
<b>FIGURA 4.12:</b> DIAGRAMA DE OJO PARA 1000 MHZ EN 50 M (IZQUIERDA) Y 65 M (DERECHA) .....	43
<b>FIGURA 4.13:</b> COMPARACIÓN LD7 Y VL SIN DISPERSIÓN .....	44
<b>FIGURA 4.14:</b> DIAGRAMAS DE OJO DE LAS DOS FUENTES (ARRIBA LD7, ABAJO VL) CON 50 M DE GI-POF (IZQUIERDA) Y ATENUADOR (DERECHA) .....	45
<b>FIGURA 5.1:</b> S21 (IZQUIERDA) Y RESPUESTA FRECUENCIAL (DERECHA) DE GI-POF 75 M CON VL .....	46
<b>FIGURA 5.2:</b> RESPUESTA FRECUENCIAL (IZQUIERDA) Y EAF (DERECHA) DE GI-POF 75 M CON VL Y LD7 .....	47
<b>FIGURA 5.3:</b> RESPUESTA FRECUENCIAL (IZQUIERDA) Y EAF (DERECHA) DE GI-POF 50 M CON VL Y LD7 .....	47
<b>FIGURA 5.4:</b> S21 (IZQUIERDA) Y RESPUESTA FRECUENCIAL (DERECHA) DE GI-POF 75 M CON VL Y RABILLO DE GH.....	48
<b>FIGURA 5.5:</b> COMPARACIÓN DE RESPUESTAS FRECUENCIALES Y EAFs.....	49
<b>FIGURA 5.6:</b> PERFIL RADIAL Y RESPUESTA FRECUENCIAL DE GI-POF 50 M (ARRIBA) Y 75 M (ABAJO) CON VL.....	50
<b>FIGURA 5.7:</b> RESPUESTA EN FRECUENCIA CON FIBRA DE 50 M (IZQUIERDA) Y 75 M (DERECHA) PULIDA EN UNO O DOS EXTREMOS .....	51
<b>FIGURA 5.8:</b> RESPUESTA FRECUENCIAL CON FIBRA DE 29 M PULIDA EN LOS DOS EXTREMOS.....	52
<b>FIGURA I.1:</b> CORTADORA METÁLICA DE 1.5 Y 2 MM.....	58
<b>FIGURA I.2:</b> CORTADORA METÁLICA DE 0.75 Y 1 MM.....	58
<b>FIGURA I.3:</b> CORTADORA DE PLÁSTICO DE 0.75 Y 1 MM .....	58
<b>FIGURA I.4:</b> PELADORA MICRO-STRIP.....	58
<b>FIGURA I.5:</b> MOVIMIENTO DE 8 EN EL PROCESO DE PULIDO .....	59
<b>FIGURA I.6:</b> DISCOS DE SOPORTE Y PAPEL DE LIJA DE GRANO FINO (IZQUIERDA) Y DE GRANO GRUESO (DERECHA) [29] .....	59
<b>FIGURA II.1:</b> ESQUEMA DEL SISTEMA DE MEDIDA DE ATENUACIÓN ESPECTRAL .....	60
<b>FIGURA II.2:</b> COMPARACIÓN ATENUACIÓN DISTINTOS CARRETES .....	61
<b>FIGURA III.1:</b> INTERFAZ GRÁFICO DEL PROGRAMA DE MEDIDA DE LAS RESPUESTAS FRECUENCIALES .....	62
<b>TABLA III.1:</b> PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN ÓPTIMOS DE MEDIDA DE RESPUESTA FRECUENCIAL.....	63
<b>FIGURA III.2:</b> INTERFAZ DEL PROGRAMA DE MEDIDA DEL CAMPO LEJANO.....	64
<b>FIGURA III.3:</b> INTERFAZ DEL PROGRAMA DE MEDIDA DE BER [20].....	65
<b>FIGURA IV.1:</b> POTENCIA RF -3 dBm. DOMINIO TEMPORAL.....	66
<b>FIGURA IV.2:</b> POTENCIA RF -3 dBm. DOMINIO FRECUENCIAL .....	67
<b>FIGURA IV.3:</b> POTENCIA DE RF +3 dBm. DOMINIO TEMPORAL .....	67
<b>FIGURA IV.4:</b> POTENCIA DE RF +3 dBm. DOMINIO FRECUENCIAL .....	68
<b>FIGURA IV.5:</b> FRECUENCIA RF 100 MHZ.....	68
<b>FIGURA IV.6:</b> FRECUENCIA RF 1 GHZ .....	69
<b>FIGURA IV.7:</b> FRECUENCIA RF 2 GHZ .....	69
<b>FIGURA IV.8:</b> POTENCIA RF -3 dBm. DOMINIO TEMPORAL.....	70
<b>FIGURA IV.9:</b> POTENCIA RF -3 dBm. DOMINIO FRECUENCIAL .....	70
<b>FIGURA IV.10:</b> POTENCIA RF +3 dBm. DOMINIO TEMPORAL.....	71
<b>FIGURA IV.11:</b> POTENCIA RF +3 dBm. DOMINIO FRECUENCIAL .....	71
<b>FIGURA IV.12:</b> FRECUENCIA RF 100 MHZ.....	72
<b>FIGURA IV.13:</b> FRECUENCIA RF 1 GHZ .....	72
<b>FIGURA IV.14:</b> POTENCIA RF -3 dBm. DOMINIO TEMPORAL.....	73
<b>FIGURA IV.15:</b> POTENCIA RF -3 dBm. DOMINIO FRECUENCIAL .....	73
<b>FIGURA IV.16:</b> POTENCIA RF 0 dBm. DOMINIO TEMPORAL .....	74
<b>FIGURA IV.17:</b> POTENCIA RF 0 dBm. DOMINIO FRECUENCIAL .....	74
<b>FIGURA IV.18:</b> FRECUENCIA RF 100 MHZ.....	75
<b>FIGURA IV.19:</b> FRECUENCIA RF 1 GHZ .....	75

# Capítulo 1 : Introducción

## 1.1. Contexto y motivación

La finalidad de este proyecto es avanzar en la aplicación de la tecnología asociada a las fibras ópticas de plástico (POFs) en redes de comunicaciones de corto alcance, habituales tanto en medios de transporte (vehículos, aviones) como en hogares en el marco de la línea de investigación del equipo de trabajo en POF del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del I3A. En concreto, se pretende realizar una caracterización completa de las propiedades de transmisión de la fibra de gradiente de índice (GI-POF) de polimetil-metacrilato (PMMA) y 1 mm de núcleo.

Actualmente, las fibras ópticas de plástico se han convertido en un medio de transmisión competitivo para entornos de corto alcance debido al bajo coste de la fibra y los componentes asociados [1]. El uso de la POF en automóviles para transmisión de datos a baja velocidad ha estado en vanguardia pues en este entorno es crucial tanto su fácil manipulación que abarata los costes de instalación y mantenimiento, así como su resistencia a curvaturas, vibraciones, etc. [2]. Más recientemente, el éxito de las redes domésticas basadas en POF ha motivado el interés de introducir estas fibras también en aeronaves [3] [4]. La creciente automatización en todos estos entornos y la necesidad de posibilitar la transmisión de contenidos multimedia han puesto en evidencia las limitaciones de las POFs. Por ello, la investigación en los últimos años se ha centrado en conseguir sistemas POF de mayor capacidad mediante el estudio de nuevos tipos de fibra con mayor ancho de banda potencial, como las GI-POF, y el diseño de nuevas técnicas de transmisión con mayor eficiencia espectral [5].

Entre los tipos de fibras de plástico, existen las de salto de índice (SI-POF) y las de índice gradual (GI-POF). Las primeras son las más extendidas y fáciles de fabricar y manipular, mientras que las últimas presentan un mayor ancho de banda. Concretamente, las GI-POF fabricadas con materiales perfluorinados tienen propiedades de transmisión comparables a las fibras multimodo de vidrio [6]. Sin embargo, estas fibras tienen un tamaño y apertura menores que los de las POF estándar por lo que requieren dispositivos más sofisticados encareciendo su instalación. Las fibras GI-POF de PMMA y 1 mm de núcleo conjugan las ventajas de las POF estándar por su tamaño y apertura con un ancho de banda bastante mayor, aunque también presentan una mayor atenuación.

A pesar de estas ventajas, y de que se ha utilizado este tipo de fibra en algunas aplicaciones [7], no hay todavía una caracterización completa y precisa de sus propiedades frecuenciales, ni de las fuentes y detectores ópticos más adecuados para aprovechar todo su potencial como medio de transmisión. Por ello, la caracterización de las propiedades de transmisión de la GI-POF en función de la longitud de fibra utilizando dispositivos activos idóneos constituye el objetivo principal de este trabajo. Esta caracterización, no sólo es necesaria para definir de forma precisa los requerimientos de los componentes activos y los entornos más adecuados de aplicación, sino que es indispensable para diseñar modelos específicos para este tipo de fibra en la línea de los que existen para SI-POF [8], que permitan predecir su comportamiento en dichos entornos y analizar los formatos de transmisión más adecuados [9].

En un trabajo previo en el que se abordó la obtención del ancho de banda de la GI-POF de 1 mm se concluyó que las propiedades frecuenciales de las fuentes ópticas y detectores disponibles en ese momento no permitían realizar una caracterización precisa de la respuesta en frecuencia de este tipo de fibra [10]. El sistema de medida que se utilizó estaba basado en una base utilizada

para alimentar y modular la fuente óptica, y un fotodetector de área grande seguido de un amplificador de radiofrecuencia. Esta combinación impone un límite a la máxima frecuencia del sistema, en torno a 0.75 GHz, que está bastante por debajo del de las fibras testeadas de mayor longitud en dicho trabajo (75 metros). Otro inconveniente es las altas pérdidas de inserción y atenuación que implican la necesidad de fuentes ópticas de alta potencia de emisión y detectores con gran sensibilidad.

El detector SPD-2 fabricado por Graviton recientemente adquirido por el grupo de POF presenta una respuesta en frecuencia bastante plana con un ancho de banda del orden de GHz y gran sensibilidad para la detección de potencias ópticas muy bajas. Estas ventajosas propiedades han motivado que se plantee el objetivo de nuevo la caracterización completa de las GI-POF y el estudio de la dependencia de sus propiedades de transmisión en función del tipo de inyección.

La influencia de la inyección en SI-POF, que depende de la distribución espacial de la fuente y de la terminación del extremo de la fibra por el que incide la luz, se ha observado, analizado y modelado debido a su fuerte impacto en las propiedades de transmisión [11]. En experimentos previos, se observó que el comportamiento de las GI-POF en cuanto a inyección difiere bastante del encontrado en las SI-POF. Por ello, en todos los experimentos realizados en este trabajo, se han controlado de forma muy precisa las condiciones de inyección y, además, se han diseñado experimentos específicos para analizar estos efectos.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal es la caracterización experimental completa de la fibra de PMMA de 1 mm de núcleo y perfil de gradiente de índice, fabricada por la compañía coreana Optimedia Inc. [12] que es la única que fabrica este tipo de fibra desde el año 2003. Debido a las particularidades de este tipo de fibra, para abordar este objetivo de forma adecuada, se hace necesario conocer previamente y de forma precisa las características de los dispositivos utilizados de forma que podamos seleccionar el modo de operación más ventajoso para cada una de ellas sin superar los valores límites o introducir distorsión. Por otra parte, como se ha dicho, un aspecto de fuerte impacto en las propiedades de transmisión de la fibra son las condiciones de inyección por lo que su influencia se ha considerado de forma específica. De esta manera, se definen tres objetivos para articular el objetivo principal:

- Caracterización de fuentes ópticas y detectores mediante equipos y montajes experimentales disponibles en el laboratorio de POF del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) para seleccionar la combinación o combinaciones más adecuadas para la medida de las propiedades de la GI-POF de PMMA de 1 mm de núcleo.
- Determinación experimental mediante el método de corte de las propiedades de transmisión: atenuación, respuesta en frecuencia, distribución angular de intensidad y la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*), en función de la longitud, utilizando los dispositivos activos seleccionados.
- Análisis de la influencia de la inyección en las propiedades de transmisión de la GI-POF, mediante experimentos específicos que permitan deducir las causas de las diferencias de comportamiento respecto de la SI-POF.

### **1.3. Estructura de la memoria**

Además de esta introducción, la memoria se organiza en 5 capítulos que desarrollan los objetivos enunciados.

En el Capítulo 2 se presenta de forma breve el contexto y propiedades de las POFs. Los tres capítulos siguientes desarrollan los objetivos planteados en este trabajo:

En el Capítulo 3 se describen los sistemas, experimentos y resultados obtenidos en la caracterización del detector SPD-2 y las fuentes seleccionadas para realizar la caracterización de la GI-POF.

En el Capítulo 4 se estudian las propiedades de transmisión de la GI-POF mediante una variante del método de corte: potencia óptica recibida, respuesta en frecuencia, distribución de intensidad y BER.

En el Capítulo 5 se estudia la influencia de la inyección en las propiedades de transmisión de la fibra GI-POF mediante medidas de respuesta en frecuencia y distribución de intensidad para las dos fuentes.

Por último, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo que permitirán abrir nuevas líneas definiendo de forma precisa los requerimientos de los componentes activos para GI-POF y los entornos más adecuados para sistemas basados en este tipo de fibra según su capacidad y longitud de enlace.

## Capítulo 2 : Fibras ópticas de plástico

Las fibras ópticas son guías de luz cilíndricas que se basan en el fenómeno de la reflexión total para la transmisión de la luz con muy pocas pérdidas. La reflexión total se produce en la intercara de un medio con un índice de refracción mayor (que se suele denominar núcleo) con otro de índice menor (cubierta).

Las fibras ópticas de plástico se han utilizado durante muchos años tanto en automoción como en el área industrial, ya que sus características físicas las hacen adecuadas en ambientes hostiles y para aplicaciones sensibles a la interferencia electromagnética. Desde la primera fibra fabricada en torno a 1960 hasta hace unos años, su tasa de transmisión estaba limitada a decenas de Mbps, pero recientemente y ante las crecientes necesidades, se ha demostrado que en sistemas de corta distancia (decenas de metros) pueden alcanzarse mayores velocidades. Las diferencias más notables entre las POF y otros medios de transmisión ópticos están relacionadas con sus características físicas: mayor tamaño y apertura numérica, lo que permite su uso con dispositivos activos menos exigentes en cuanto a precisión. Además, aspectos como la mayor seguridad ocular al trabajar en el rango visible han sido cruciales para potenciar su aplicación en el entorno doméstico. En general, su robustez y su competitividad en cuanto a coste, han convertido a las fibras de plástico en un medio de transmisión adecuado para desplegar redes de comunicaciones en entornos con exigencias moderadas de producto ancho de banda-distancia.

Estas fibras están hechas de polímero y presentan un diámetro de núcleo de aproximadamente 1 mm, aunque también los hay más pequeños. Pueden clasificarse según su material, el cual determina la atenuación y temperatura de operación, según sus características geométricas, y según sus características ópticas, como el perfil de índice, el cual determina el ancho de banda. El material más común en la fabricación de las POF es el polimetil-metacrilato, cuyo índice de refracción es de 1.492 y que puede soportar temperaturas de hasta 85°C. La cubierta de estas fibras es muy fina y tiene un índice de refracción en torno a 1.41 por lo que su apertura numérica (NA) normalmente es de casi 0.5. También se fabrican otras fibras con materiales perfluorinados de menor tamaño (250 micras) que las fibras de PMMA, y cuya atenuación y dispersión son mucho menores que las de éstas [6].

Las fibras de plástico de PMMA se presentan en dos tipos según el perfil de índice: las fibras con salto de índice, y las fibras de índice gradual, que son en las que se centra este trabajo. Además, existen otras fibras especializadas para ciertos usos, como las MC-POF (Multi core), con varios núcleos de menor tamaño, o las MSI-POF (Multi salto de índice) que representan un perfil de índice gradual mediante varios saltos de índice.

En los siguientes apartados, se van a definir las principales propiedades de transmisión de las fibras ópticas: atenuación y dispersión, especificando las particularidades en el caso de las POF de PMMA y haciendo particular hincapié en las fibras de gradiente de índice.

### 2.1. Propiedades de transmisión: atenuación, dispersión

Las fibras de plástico tienen mayor tamaño que las de vidrio: entre 200 y 1000 micras de diámetro de núcleo frente a las 62.5 o 50 de las fibras multimodo de SiO<sub>2</sub>. Su apertura numérica también es bastante mayor, hasta de 0.5 frente a 0.2 de la fibra multimodo estándar. Por ello,

normalmente son capaces de transmitir millones de modos, lo que condiciona su capacidad de transmitir información. De esta forma, más que un conjunto discreto de modos como en el caso de las fibras multimodo de vidrio, suele hablarse de que en la POF se transmite una distribución de potencia continua en función del ángulo de propagación.

Por otra parte, los materiales con los que se fabrican, particularmente el polimetilmetacrilato, son altamente difusivos, lo que se traduce en un acoplo modal mayor y mayores pérdidas de potencia que para fibras fabricadas con otros materiales. Se denomina acoplo modal al intercambio de energía entre los modos, normalmente adyacentes, que además de por la difusión se produce por irregularidades y heterogeneidades. Este intercambio provoca una redistribución de dichos modos que afecta a las propiedades de transmisión de la fibra [13].

En este apartado se describen brevemente las propiedades de la fibra óptica de plástico que limitan sus prestaciones como medio de transmisión en un sistema de comunicaciones: la atenuación y la dispersión. En el caso de las POFs, las medidas de estas propiedades presentan una alta variabilidad debida a que sus características se traducen en una gran sensibilidad a la distribución espacial de la inyección y una notable influencia de distintos factores externos (curvaturas, presión, etc.). Otro factor fundamental en cuanto a su impacto sobre estas propiedades, es la terminación de los extremos de la fibra y la forma en la que se conectan a los dispositivos activos (fuentes y detectores), por lo que en el Anexo I se ofrece una descripción de las principales herramientas de preparación que se han utilizado en este trabajo [11].

### 2.1.1. Atenuación

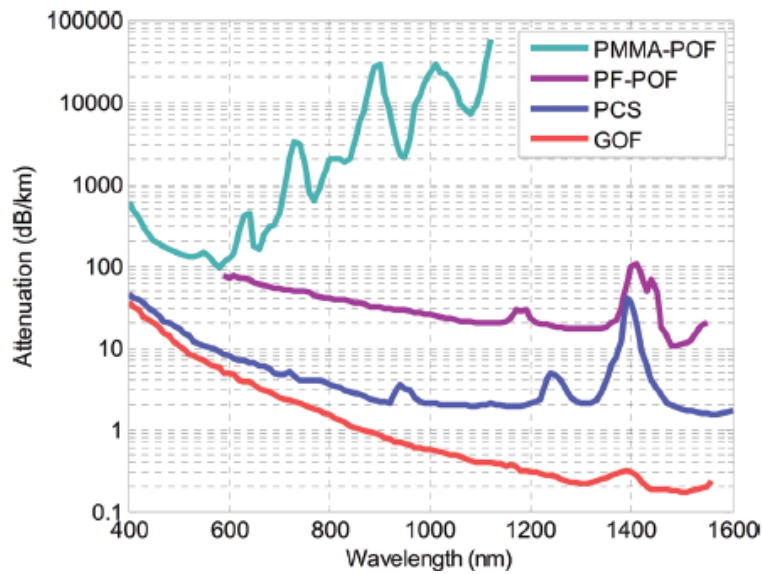
La atenuación es la pérdida de potencia óptica en la transmisión y varía para cada tipo de fibra. En la fibra óptica, la potencia decrece exponencialmente con la distancia  $l$ , como se muestra en la siguiente expresión:

$$P(l) = P(0)10^{\frac{-\alpha \cdot l}{10}} \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación de la fibra óptica y expresa el valor de la atenuación como una función de la longitud de la fibra.

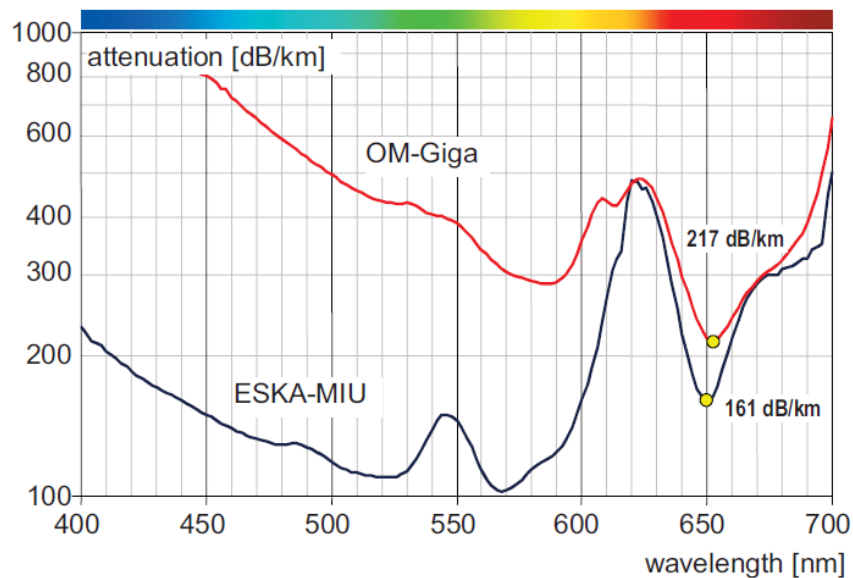
Son varios los efectos que causan la atenuación, entre los cuales caben destacar la absorción, tanto intrínseca como extrínseca, el *scattering* o difusión, y la radiación. Además, la atenuación también depende de la anchura del espectro y de la apertura numérica de la fuente de luz utilizada. Un aumento de cualquiera de ellos conlleva un aumento de atenuación.

En la **Figura 2.1**, se compara la atenuación de distintos tipos de fibras, incluyendo POF de distintos materiales. La figura muestra que la atenuación de las PMMA-POF es bastante mayor que la del resto de las fibras y que, además, presenta mínimos en regiones del espectro diferentes de las tradicionales ventanas de las fibras de vidrio, entre el visible y el infrarrojo cercano. De hecho, la atenuación en PMMA presenta dos mínimos absolutos en torno a 522 y 570 nm (verde) y un mínimo relativo alrededor de 650 nm (rojo). El valor de la atenuación en estos mínimos se encuentra en torno a los 150-200 dB/km. Por otra parte, las fibras de plástico fabricadas con materiales perfluorinados tienen sus mínimos de atenuación en la región del infrarrojo similarmente las fibras de vidrio, pero sus valores son mayores que los de éstas.



**Figura 2.1:** Atenuación espectral de diferentes fibras: PMMA-POF, PF-POF, PCS y GOF [14]

En la **Figura 2.2** se ofrece una comparación de la atenuación espectral de una fibra de PMMA de salto de índice con la fibra OMGIGA. Esta última presenta una mayor atenuación en todo el rango de longitudes de onda. Además, a pesar de que están fabricadas son del mismo material, la forma de la curva de atenuación es diferente. Concretamente, en el rango de 500-550 nm donde la SI-POF tiene sus mínimos absolutos, la OMGIGA presenta una atenuación muy elevada. Para corroborar este resultado, se ha caracterizado el carrete utilizado en los experimentos utilizando el sistema experimental del laboratorio. La descripción del mismo y de los experimentos se presenta en el Anexo II.

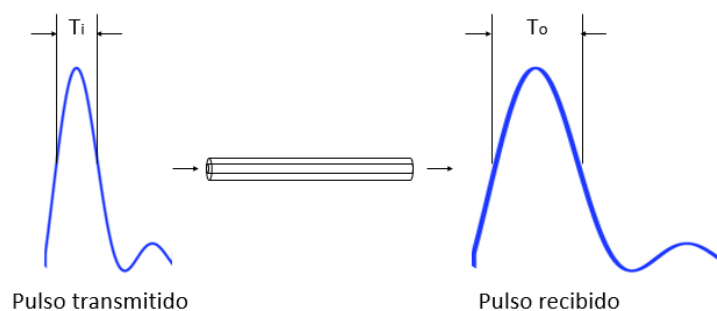


**Figura 2.2:** Comparación de la atenuación de la SI-POF de PMMA con OMGIGA [1]



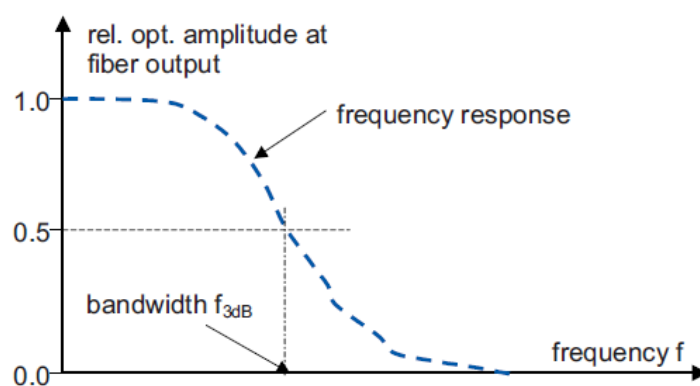
### 2.1.2. Dispersión

La dispersión es la diferencia en la velocidad de propagación de distintas componentes de la potencia óptica. Estas componentes pueden ser modos, longitudes de onda, polarizaciones, etc. Durante su propagación, los pulsos transmitidos a través de la fibra se ensanchan debido a la dispersión, como se puede ver en la **Figura 2.3**. Por este motivo, la dispersión es el parámetro que determina el máximo ancho de banda que puede ser transmitido a través de la fibra.



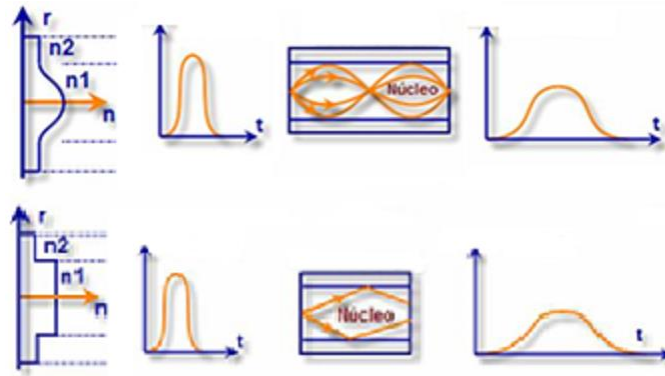
**Figura 2.3:** Dispersión temporal en una POF [13]

El ensanchamiento de los pulsos transmitidos se traduce en una degradación de la respuesta en frecuencia. De esta forma, es posible definir el término ancho de banda como el rango de frecuencias de un sistema dentro del cual la transmisión de señales se puede lograr con una atenuación razonable [1]. En la **Figura 2.4**,  $f_{3dB}$  representa la frecuencia a la cual la amplitud de una senoide modulada cae a la mitad del nivel óptico.



**Figura 2.4:** Definición de ancho de banda de la POF [1]

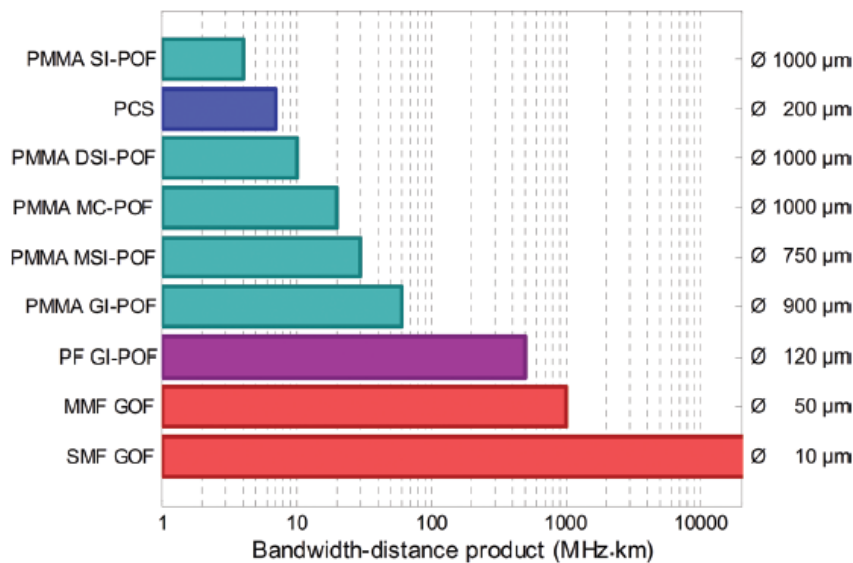
En el caso de las POFs la dispersión dominante es la intermodal, que es difícil cuantificar ya que, debido a su fuerte dependencia con las condiciones de inyección y el acoplo modal, las medidas presentan una alta variabilidad. La dispersión modal introduce diferentes retardos entre los distintos modos ensanchando los pulsos transmitidos, lo que lleva a un ancho de banda menor. Este ensanchamiento se ilustra en la parte inferior de la **Figura 2.5** para fibras de salto de índice. Para reducir este efecto, se fabrican fibras de plástico de gradiente de índice que se caracterizan por tener un núcleo con un índice de refracción variable, siendo máximo en el centro y disminuyendo gradualmente a medida que aumenta la distancia al eje de la fibra, hasta llegar al valor mínimo e igual al índice de refracción del revestimiento. Este hecho permite reducir la dispersión modal producida por el retardo entre rayos derivado de la diferencia de caminos entre ellos.



**Figura 2.5:** Fibra de índice gradual (arriba). Fibra de salto de índice (abajo)

Como se puede ver en la parte superior de la **Figura 2.5**, los rayos de luz se curvan y no siguen trayectorias rectilíneas debido a que el índice de refracción no es constante. Aquellos haces que viajan más cercanos al núcleo recorren menos distancia, pero a velocidad menor, ya que en el centro del mismo el índice de refracción es mayor. Por el mismo motivo, aquellos rayos que viajen más alejados del núcleo lo harán a mayor velocidad ya que el índice de refracción es menor. De esta manera, en este tipo de fibra, las diferencias entre los retardos de los rayos son menores que en una de salto de índice, aunque a costa de una mayor atenuación. Por tanto, debido a que la GI-POF tiene una dispersión modal bastante menor, su ancho de banda es mayor que el de la SI-POF.

En la **Figura 2.6** se representan gráficamente los productos de ancho de banda-distancia para distintos tipos de fibra. Se pueden apreciar grandes diferencias: desde los 4 MHz x km de las PPMA SI-POF hasta alrededor de 1 GHz x km de las MMF-GOF, o incluso hasta un límite desconocido de las SMF-GOF. Se observa también que la fibra perfluorinada (PF GI-POF) tiene propiedades comparables a los de la MMF de vidrio. La GI-POF de PMMA, aunque sin llegar a las altas prestaciones de las fibras de vidrio o perfluorinadas, se decanta como una buena opción, por delante del resto de fibras de PMMA.



**Figura 2.6:** Comparación de anchos de banda por distancia de distintos tipos de fibra [14]

## Capítulo 3 : Caracterización y selección de dispositivos activos

Como se ha dicho en la introducción, se va a utilizar el detector SPD-2 de Graviton cuyas propiedades se enumeran en la hoja de características disponible en el Anexo V, destacando la combinación de ancho de banda: 1.2 GHz y alta sensibilidad: -27.3 dBm.

Para poder planificar los experimentos de caracterización de GI-POFs de distintas longitudes es necesario determinar algunas propiedades del SPD-2 con mayor precisión que en las hojas de características. Este es el caso de la potencia de saturación y factor de conversión, cuya determinación experimental se describe en el primer apartado de este capítulo.

Por otra parte, se dispone de varias fuentes ópticas con distintas longitudes de onda y potencias de emisión por lo que es necesario hacer una caracterización individualizada de las mismas para seleccionar las más adecuadas para GI-POF en los distintos rangos de longitud de fibra. En primer lugar, se han elegido las fuentes con emisión en la región de mínima atenuación de la GI-POF [Anexo II]. Para estas fuentes se han obtenido la relación de la potencia óptica con respecto a la intensidad del diodo láser, la respuesta en frecuencia utilizando el detector SPD-2, la distorsión armónica total que sufre el sistema al modular el láser y, por último, la distribución espacial de intensidad medida con fibras cortas que es una función indispensable para determinar las condiciones de inyección en POF.

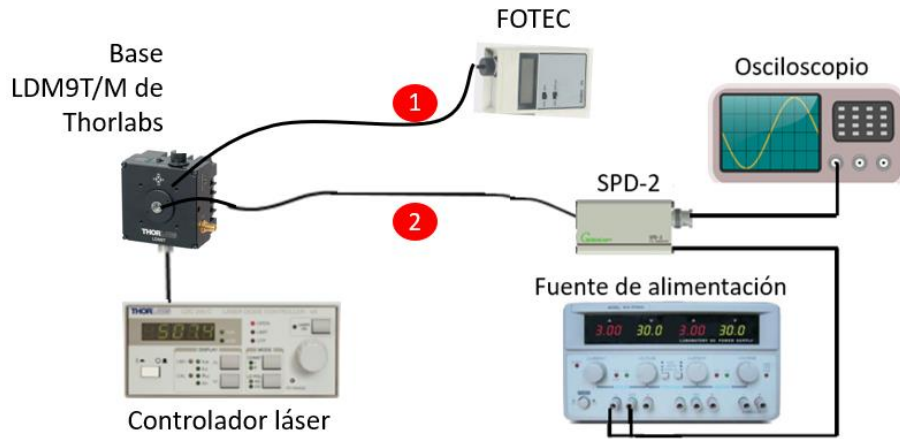
Finalmente, se ha realizado una caracterización del sistema completo en las condiciones óptimas determinadas por el estudio anterior para cada fuente y utilizando como detector el SPD-2. Para ello, se ha unido el emisor y detector con una fibra de 1.5 metros y se ha determinado la tasa de error de bit utilizando un generador/analizador de secuencias de bits (OptoBERT): BER en función de la tasa de bit para distintas potencias recibidas y BER en función de la potencia recibida para varias tasas de bit.

Las hojas de características de todos los dispositivos que se van a caracterizar, así como de los equipos de medida utilizados para ello se encuentran recopilados en el Anexo V al final de la memoria.

### 3.1. Determinación de la potencia de saturación y factor de conversión del SPD-2

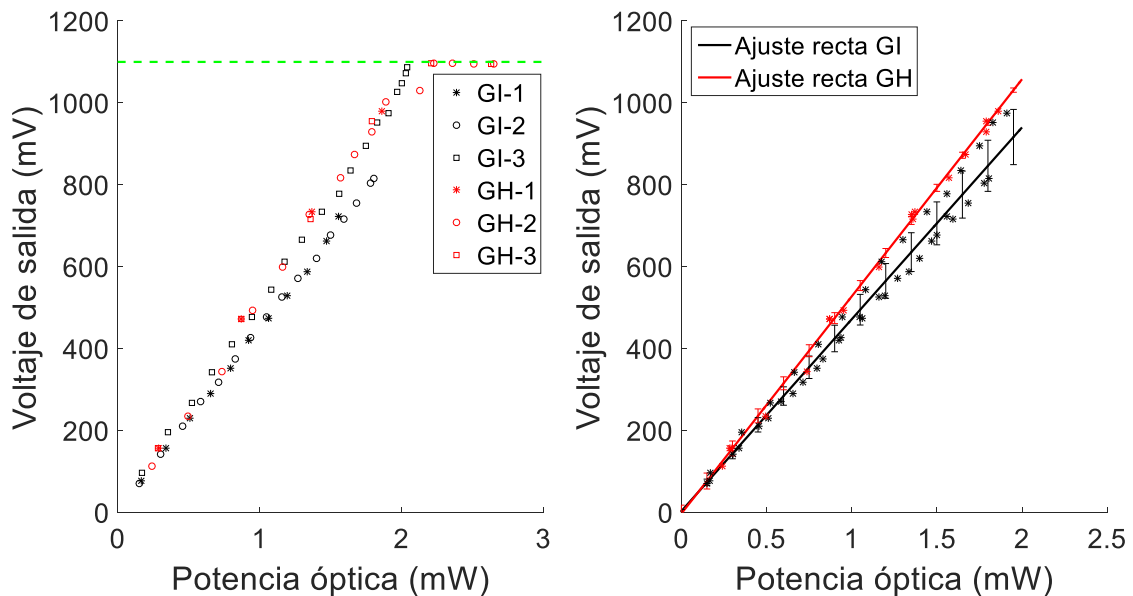
En las hojas de características del SPD-2 figura una potencia de saturación de -4 dBm y un factor de conversión de 1000 mV/mW medidos para luz de 650 nm con una fibra de multimodo de vidrio con núcleo de 50 micras de diámetro, cuya apertura numérica es de 0.2. El diseño del SPD-2 incluye una lente que focaliza la potencia que sale de la fibra en la zona activa del detector y que limita la apertura a 0.25. Esta apertura supone que toda la luz de la fibra de vidrio llegará al detector, pero esto no tiene por qué ser así en el caso de las POFs, cuyas aperturas son cercanas a 0.5. Por tanto, es necesario obtener estos parámetros de nuevo ya que es fundamental evitar la saturación en la caracterización de la respuesta en frecuencia de las fibras y de la tasa de error de bit del sistema. Para ello, vamos a obtener experimentalmente el voltaje que produce el detector en función de la potencia óptica a la salida de la fibra de forma que, además de determinar en qué condiciones se produce la saturación, la pendiente de esta curva nos dará el valor del factor de conversión del detector en la longitud de onda correspondiente.

En la **Figura 3.1** se presenta esquemáticamente el sistema experimental utilizado basado en un láser LD650P007 que emite luz de 650 nm montado en una base (LDM9T de Thorlabs) que es alimentada con un controlador de corriente (LDC200, también de Thorlabs). La luz del láser se inyecta directamente sin modular en un segmento corto de fibra midiendo la potencia óptica a su salida mediante el medidor de potencia (FM300 de FOTEC) específico para fibras de plástico. Después de medir la potencia, el extremo de salida de la fibra se conecta al SPD-2 determinando el voltaje utilizando un osciloscopio (Infiniium DCA 86100A de Agilent). En los casos en los que ha sido necesario, se han introducido atenuadores de RF para que el voltaje de salida esté dentro de los límites del osciloscopio. La potencia inyectada en la fibra se varía aumentando la corriente de alimentación del láser mediante el controlador, que es capaz de llegar hasta 200 mA.



**Figura 3.1:** Esquema del sistema experimental utilizado para medir potencia óptica (1) y voltaje (2)

La **Figura 3.2** muestra los resultados de este experimento para 3 segmentos de 1 metro de fibra de salto de índice GH y 3 de índice gradual GI-POF. La figura muestra que no se consigue saturar el SPD-2 con la fibra GI-POF, pero sí con la de salto de índice, posiblemente debido a la menor apertura de la primera.



**Figura 3.2:** Voltaje de salida en función de potencia óptica para varias fibras. Rectas ajustadas.

En el gráfico de la izquierda se puede ver que el valor máximo de voltaje producido por el SPD-2 es de 1100 voltios (marcado por la línea verde), que corresponde para estas fibras a 2 mW (3 dBm) en 650 nm medidos con el FOTEC. En la gráfica de la derecha se muestran ajustes a rectas de la parte lineal de la respuesta del detector. La pendiente para la SI-POF es de 530 mV/mW mientras que para la GI-POF es algo menor, 468 mV/mW. En cualquier caso, esta diferencia está dentro de la variabilidad de las medidas. Por otra parte, ambos valores están bastante por debajo del que aparece en las hojas de características que es de 1000 mV/mW para 650 nm. La explicación es que este valor está obtenido con fibras de vidrio, cuya apertura es 0.2 por lo que toda la potencia de salida es focalizada en la zona activa del detector, que es capaz de captar luz hasta ángulos de 15°. Sin embargo, a la salida de la mayor parte de las POF tenemos luz en ángulos de hasta 30°, lo que supone un factor de conversión mucho menor al comparar con la medida de potencia obtenida con el medidor de potencia FOTEC cuya lente tiene una mayor apertura adaptada a las POFs.

### 3.2. Caracterización de fuentes ópticas

De entre las fuentes ópticas disponibles en el laboratorio de POF de la UZ se ha realizado una preselección de forma que su longitud de onda de emisión se encuentre en la región de mínima atenuación de la GI-POF que se muestra en la **Figura 2.2** y que se ha confirmado con medidas realizadas con el sistema experimental de obtención de la atenuación espectral del laboratorio [Anexo II]. De esta forma, se han elegido tres fuentes:

- VL670 de Graviton: se trata de un VCSEL que emite en 670 nm. Esta longitud de onda no es la más ventajosa para la GI-POF, pero como contrapartida, su respuesta en frecuencia está optimizada hasta 1.5 GHz.
- LD658P040: 658 nm, 40 mW,  $I_{th} = 35$  mA y  $I_{mx} = 110$  mA, es un diodo láser de Thorlabs seleccionado por su alta potencia de emisión y amplio rango de intensidades de operación que permiten mayor amplitud potencial de modulación.
- LD650P007: 650 nm, 7 mW,  $I_{th} = 20$  mA,  $I_{mx} = 35$  mA, es un diodo láser de Thorlabs seleccionado por combinar potencia moderada de emisión justo en el mínimo de atenuación de la GI-POF y rango de modulación aceptable.

Los 2 diodos láser LD658P040 y LD650P007, que a partir de ahora se nombrarán como LD40 y LD7 para simplificar, deben recibir la corriente de polarización y la modulación a través de la base y el controlador utilizados en el experimento descrito en el apartado anterior. La base lleva incorporado un controlador de temperatura que permite variaciones de 20 a 30°C. El VL670 de Graviton, que a partir de ahora se nombrará como VL para simplificar, tiene una polarización fija y un control interno de temperatura que no está accesible, por lo que no es posible variarlas.

El objetivo de la caracterización es conocer las características de las fuentes de forma que se pueda seleccionar el modo de operación más ventajoso para cada una de ellas sin superar los valores límites o introducir distorsión. Para ello, en el caso de los dos diodos láser se han obtenido en primer lugar las curvas de potencia óptica frente a intensidad de corriente eléctrica (curvas I/P) para distintas temperaturas. Estas curvas permiten seleccionar la intensidad de corriente de polarización más adecuada para cada láser y calcular la amplitud de modulación RF máxima que

se puede aplicar en cada caso. El VL tiene la corriente de polarización fijada y no se puede modificar por lo que no es posible obtener sus curvas I/P.

En segundo lugar, utilizando como detector el SPD-2 unido por fibras de 1.5 metros de longitud a los distintos emisores, se ha medido la respuesta en frecuencia de este sistema para distintas combinaciones de corriente de polarización, temperatura y modulación mediante un sistema basado en un analizador vectorial de redes (VNA, *Vector Network Analyzer*).

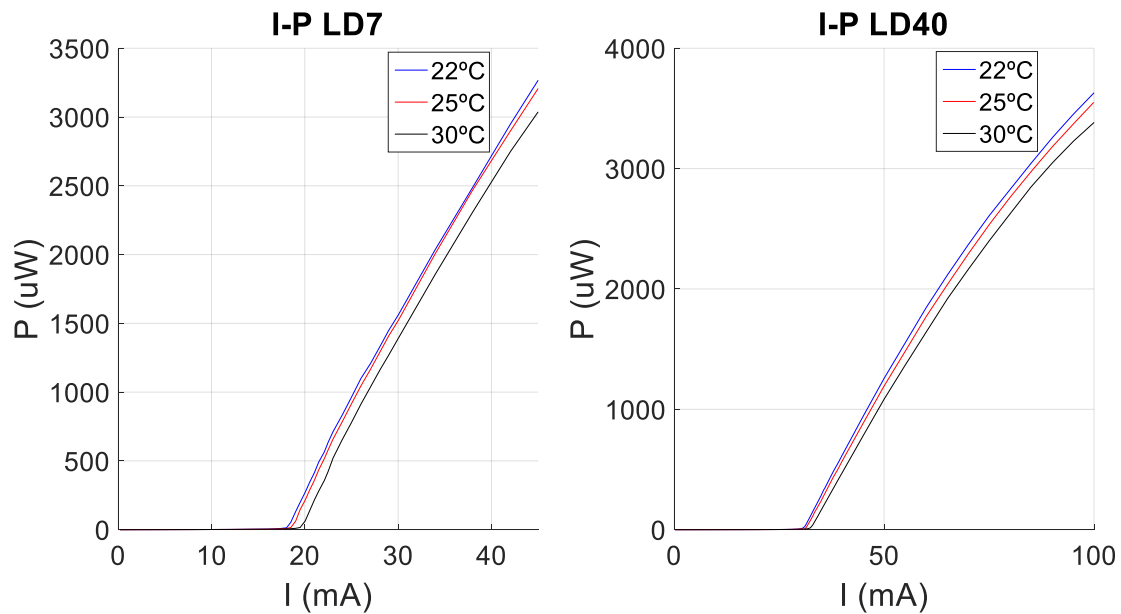
El siguiente paso ha sido, para cada emisor y siempre usando como detector el SPD-2, obtener el parámetro de distorsión armónica total en función de la amplitud de modulación y de la frecuencia. Para los dos diodos, este parámetro se obtiene en las combinaciones de corriente de polarización y temperatura preseleccionadas. Con estas medidas es posible determinar las modulaciones máximas permitidas para cada fuente en las distintas condiciones.

Por otra parte, en el caso de las POFs es importante conocer la distribución espacial de la potencia óptica en la entrada de la fibra, es decir, en la inyección. Por ello, para completar la caracterización de cada una de las fuentes, se ha obtenido la distribución de intensidad en función del ángulo de propagación mediante medidas del patrón de campo lejano de fibras cortas utilizando un sistema experimental previamente diseñado para ello [15].

### **3.2.1. Curvas de Potencia óptica – Intensidad de los diodos láser**

Las curvas de Potencia óptica frente a Intensidad de corriente eléctrica permiten determinar dos parámetros importantes en los láseres: la intensidad umbral a partir de la cual comienza el régimen de emisión estimulada y la pendiente de eficiencia. Estas curvas permiten visualizar fácilmente cuáles son las zonas “críticas” que deben evitarse al modular la fuente, aquellas cercanas al umbral y al valor máximo. Además, permiten definir la máxima amplitud de modulación RF y seleccionar la intensidad de corriente de polarización que garantice el mejor funcionamiento de cada láser.

Para obtener dicha curva se dispone de un rabillo de fibra GI de 1.5 metros de longitud conectado a la base. Se estudian los láseres LD7 y LD40, cuya intensidad es posible variar mediante el controlador. Para ello, se toman los valores de potencia óptica recibida con el medidor de potencia óptica FOTEC en un intervalo de valores adecuado para no superar el máximo recomendado para cada láser. En el caso del LD7 se miden en el rango de 0 a 45 mA, y en el caso del LD40, de 0 a 100 mA, variando la intensidad cada 2 mA en la zona lineal, y cada 1 mA en la zona cercana al umbral para mayor precisión. Dicho procedimiento se lleva a cabo para tres temperaturas diferentes (22°C, 25°C y 30°C), y se obtienen las siguientes figuras:



**Figura 3.3:** Potencia en función de intensidad y temperatura para LD7 (izquierda) y LD40 (derecha)

En la **Tabla 3.1** se muestran los valores de intensidad umbral ( $I_{th}$ ) obtenidos experimentalmente, así como la pendiente de eficiencia para cada temperatura que se ha obtenido ajustando a una recta los valores a partir de la intensidad umbral:

	LD7			LD40		
Temperatura	22°C	25°C	30°C	22°C	25°C	30°C
<b><math>I_{th}</math> experimental [mA]</b>	18	18.5	19.5	30.5	31	32.5
<b>Pendiente [<math>\mu\text{W}/\text{mA}</math>]</b>	120.3	120.8	120.2	54.7	53.8	52.0

**Tabla 3.1:** Resultados experimentales de  $I_{th}$  y pendiente para las tres temperaturas de trabajo

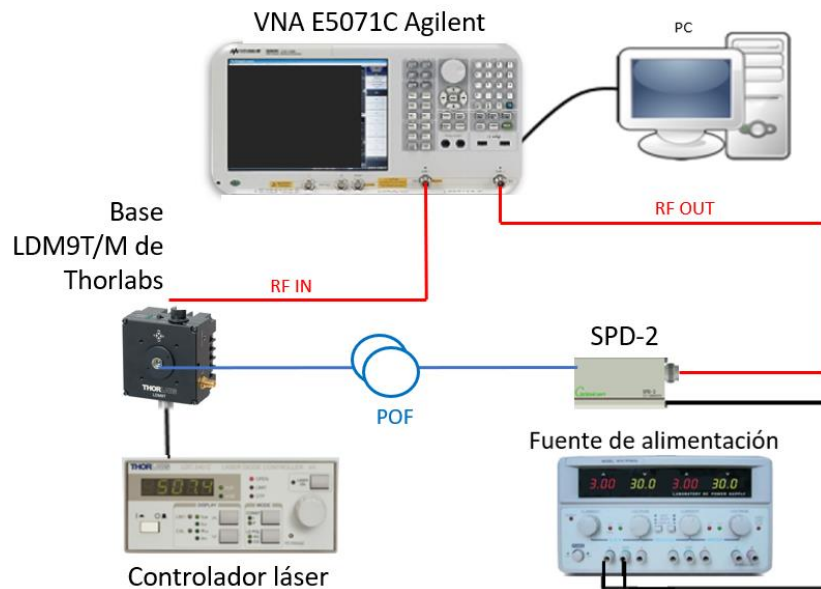
Como se puede ver, los valores de intensidad umbral obtenidos se aproximan a los especificados en las hojas de características, que son 20 mA para el LD7 y 35 mA para el LD40. Para ambos láseres, los valores umbrales experimentales aumentan con la temperatura siendo siempre menores que los nominales. Los valores de las pendientes de eficiencia son bastante menores que los que figuran en las hojas de características porque, en este caso, se han medido a través de una fibra y no directamente. El aumento de la temperatura tiene un mayor impacto sobre la eficiencia del LD40 que sobre la del LD7, que apenas se modifica.

### 3.2.2. Respuesta en frecuencia

Para tomar las medidas de la respuesta frecuencial del sistema se utiliza un sistema basado en el analizador vectorial de redes Vector Network Analyzer VNA E5071C de Agilent automatizado mediante un programa en Matlab llamado *pof.m* [Anexo III] desarrollado anteriormente como parte de un trabajo final de grado. Este programa permite tanto obtener del VNA las respuestas frecuenciales en tiempo real, como guardarlas para poder procesarlas posteriormente [16].

El VNA permite obtener los parámetros S del sistema. Este dispositivo está conectado a la entrada de modulación del láser (directamente para el VL y a través de la base para los dos diodos láser) mediante el puerto 1, y a la salida RF del detector SPD-2 mediante el puerto 2. Para hacer esta caracterización se utiliza una fibra corta (1.5 metros) que une la salida óptica de la fuente con la entrada óptica del detector. El VNA compara la señal a la salida del sistema con la señal generada en el puerto 1, obteniendo así el parámetro S21, el cual representa la respuesta frecuencial eléctrica del sistema.

A continuación, se muestra un esquema del sistema completo utilizado para llevar a cabo estas medidas de respuesta en frecuencia:



**Figura 3.4:** Esquemático del sistema utilizado para medir la respuesta frecuencial de la fibra

#### 3.2.2.1. Procedimiento de medida

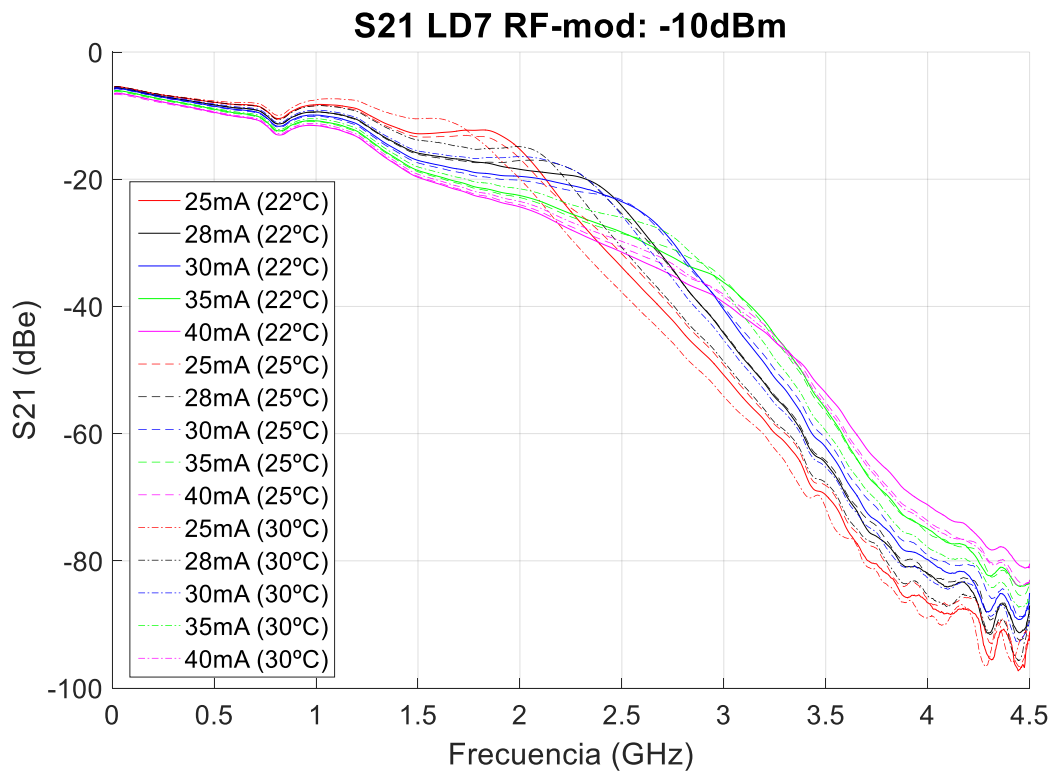
Para caracterizar la respuesta en frecuencia del sistema se utilizan rabillos de fibra de 1.5 metros de longitud conectados a las distintas fuentes y se realizan medidas combinando diferentes corrientes de polarización, temperaturas y amplitudes de RF.

Los pasos a seguir para tomar estas medidas son:



1. Cortar los extremos de la fibra, retirar la cubierta y colocar el conector adecuado a cada extremo
2. Conectar el tramo de fibra al emisor y al VNA, configurándolo con los parámetros óptimos tal y como se especifica en el Anexo III
3. Registrar y guardar la respuesta frecuencial mediante el programa *pof.m*

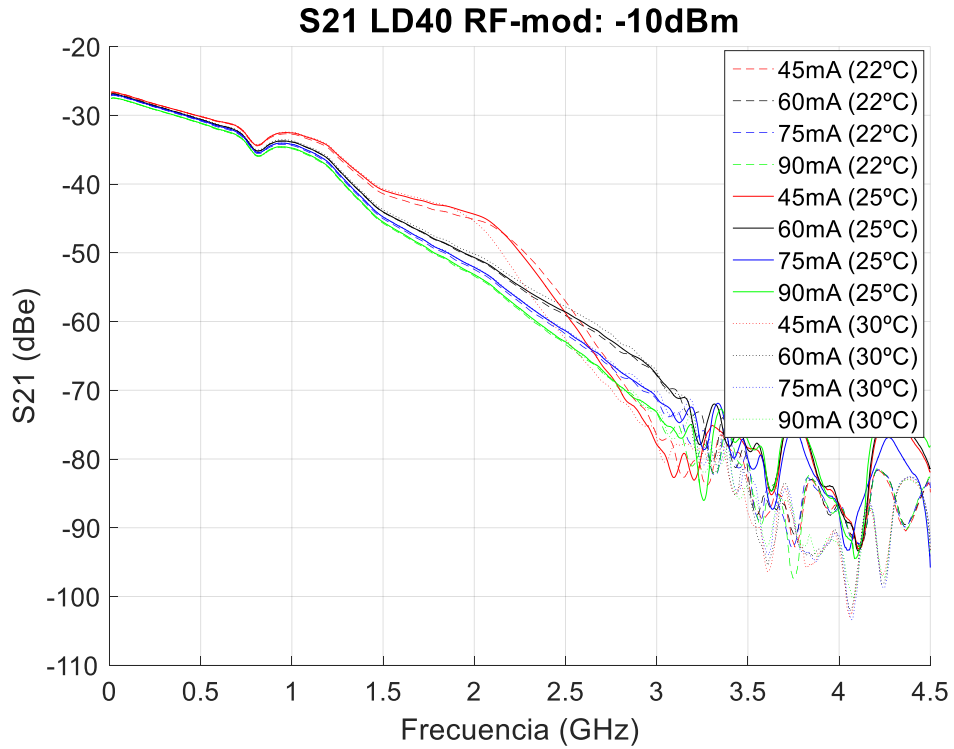
En primer lugar, utilizando el LD7, las corrientes de polarización con las que se trabaja son 25, 28, 30, 35 y 40 mA, y las temperaturas 22, 25 y 30°C, al igual que en el estudio de las curvas I/P. Los valores de intensidad se han elegido para obtener el comportamiento frecuencial de la fuente lo suficientemente alejados del umbral y del máximo, y se ha comprobado que no se excedan dichos límites al modular. En la **Figura 3.5** se muestran superpuestas todas las medidas tomadas para una amplitud de modulación de RF de -10 dBm:



**Figura 3.5:** Respuesta frecuencial del LD7 para distintas temperaturas e intensidades de polarización

Se puede ver cómo todas ellas siguen el mismo patrón, que es el típico de un diodo láser: los cambios en el S21 son más notables en lo que se refiere a la intensidad de polarización, y no tan considerables en lo que respecta a la temperatura de trabajo. Además, se aprecia un mínimo relativo en 750 MHz que es debido a la respuesta de la base.

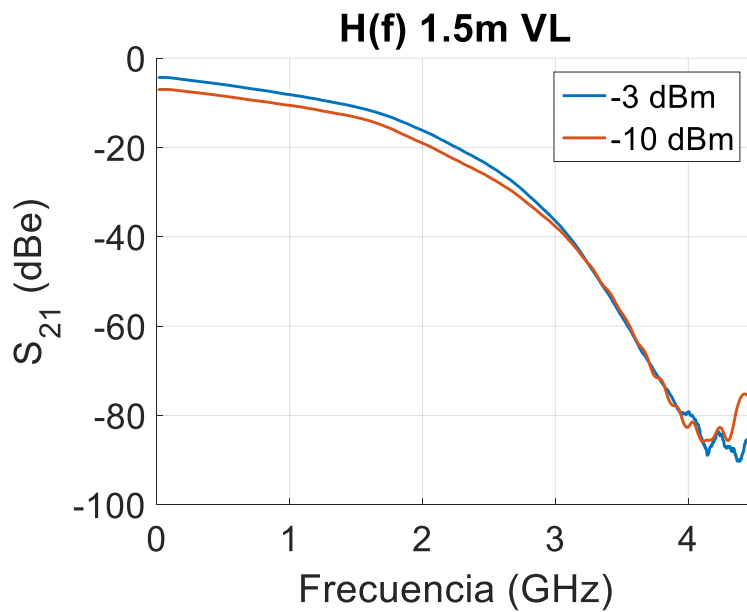
En segundo lugar, se realiza el mismo procedimiento con el LD40, pero con otros valores de intensidad adaptados a esta fuente: 45, 60, 75 y 90 mA. Visto que utilizando la fibra GI hay saturación cuando se trabaja con 90 mA, se toman todas las medidas con el atenuador de bloqueo de OZ OPTICS LTD customizado para POF. Estas medidas se muestran en la **Figura 3.6**.



**Figura 3.6:** Respuesta frecuencial del LD40 para distintas temperaturas e intensidades de polarización

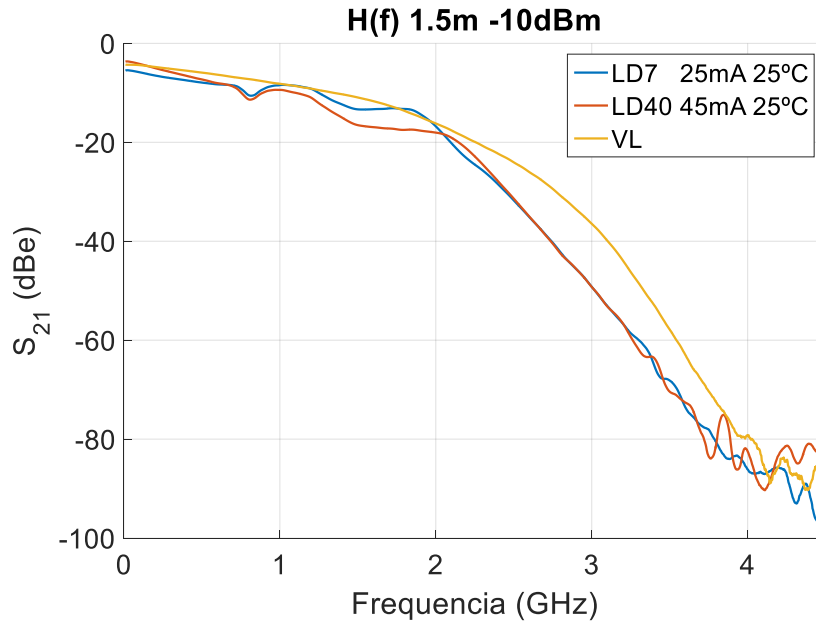
La forma es similar a la obtenida para el LD7 y se mantiene el mínimo debido a la base. La mejor respuesta en frecuencia se obtiene para una intensidad de 45 mA, pero en la región entre 1 y 2 GHz su valor disminuye notablemente con intensidades de corriente superiores.

En tercer lugar, se mide la respuesta en frecuencia utilizando el VL con un tramo de fibra de 1.5 metros de longitud y con dos potencias de RF: -3 dBm y -10 dBm. El resultado se puede ver en la **Figura 3.7**.



**Figura 3.7:** Respuesta frecuencial del VL670 de Graviton

Puede observarse que la respuesta de la fuente de Graviton es bastante más plana que las demás, pero para comparar en una escala similar, se han representado todas las medidas juntas en la **Figura 3.8** donde se muestra una comparación de las medidas óptimas de cada una de las tres fuentes utilizadas. Para esta comparación, la medida con el LD40 se ha repetido ajustando el valor de potencia recibida con el atenuador para que sea similar al de las otras dos fuentes.



**Figura 3.8:** Respuesta frecuencial óptima de cada fuente

En vista de estos resultados, la respuesta S21 del LD40 es la más baja a pesar de emitir mayor potencia y tener mayor rango de modulación, por lo que en un principio se va a descartar este láser. De las otras fuentes, el VL tiene la ventaja de su respuesta frecuencial más ancha y más plana, mientras que el LD7 presenta una mayor potencia de emisión y admite la posibilidad de modular con mayores potencias de RF.

### 3.2.3. Distorsión armónica

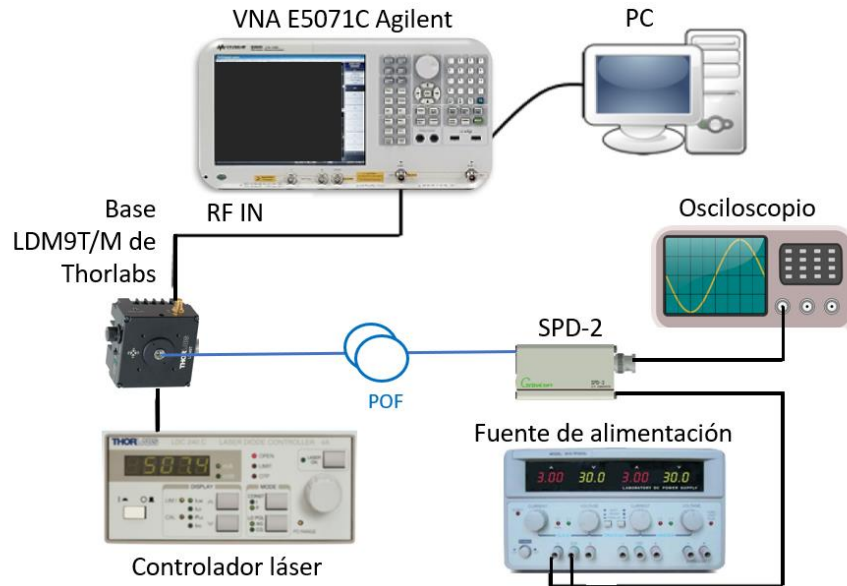
El siguiente parámetro de estudio es la distorsión armónica total o THD. Se trata de una medida cuantitativa de la distorsión que sufre la forma de onda de una senoide convencional a medida que atraviesa el sistema. Dicha distorsión se produce principalmente en múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la portadora, conociéndose como armónicos, y es causada por la mayoría de cargas no lineales presentes en el sistema. Estos armónicos se suman a la onda fundamental distorsionándola y generando así la llamada “distorsión armónica”.

Se define la THD de la siguiente manera:

$$THD = \frac{\sum \text{Potencia de los armónicos}}{\text{Potencia de la frecuencia fundamental}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{P_0} \quad [\text{Ecuación 3.1}]$$

donde  $P_0$  es la potencia de la frecuencia fundamental y  $P_i$  con  $i > 0$  es la potencia del armónico  $i$ -ésimo que contiene la señal.

Para obtener la THD se ha utilizado el esquema representado en la **Figura 3.9**. Con el VNA se genera una señal sinusoidal de una frecuencia y potencia de modulación dadas que se utiliza para modular el láser. El láser se conecta con el detector SPD-2 mediante una fibra corta o mediante el atenuador en los casos necesarios para evitar que se sature el detector. La señal de salida del detector se lleva al osciloscopio que permite su visualización y captura para su posterior procesado.

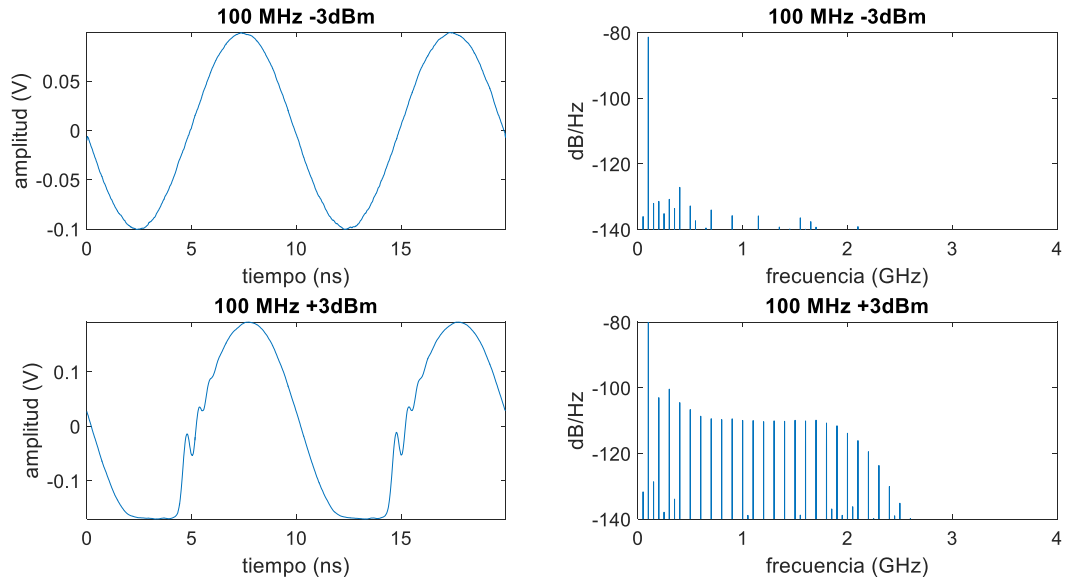


**Figura 3.9:** Esquemático del escenario para la toma de medidas de THD

La THD se ha obtenido para el LD7 y el VL670. En el caso del LD7 se ha trabajado con varias intensidades de corriente para las que se ha hecho un barrido en frecuencia con varias potencias de modulación seleccionadas y un barrido en amplitud para varias frecuencias. El VL670 de Graviton tiene fija su corriente de polarización por lo que sólo permite los barridos en frecuencia y potencia de modulación.

Para el LD7, seleccionamos corrientes de polarización lo suficientemente alejadas del umbral y de la máxima: 25 mA y 30 mA para obtener la THD en función de la potencia de RF (amplitud de modulación) y de la frecuencia.

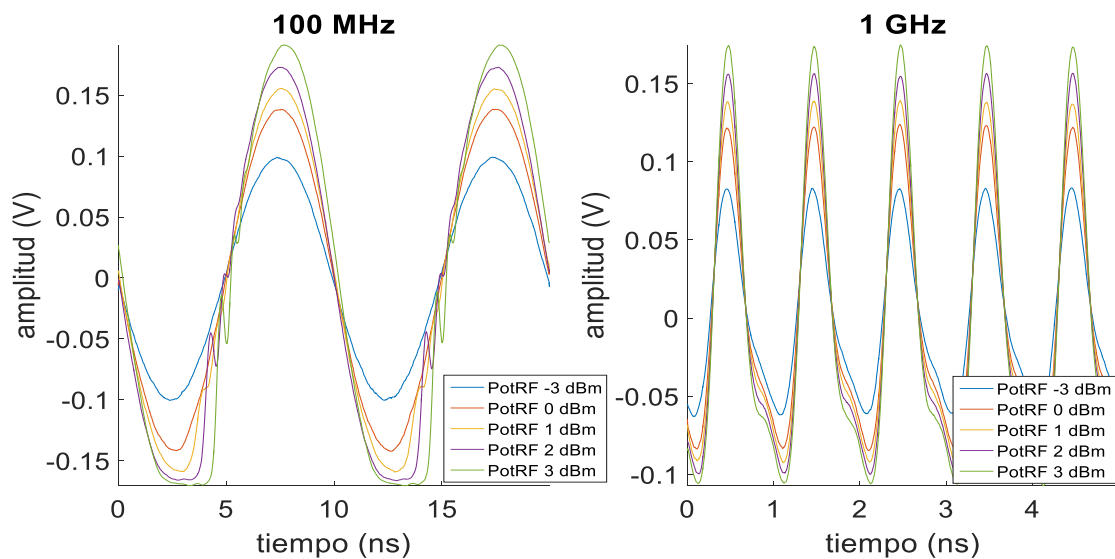
En primer lugar, se fija la potencia de RF y se ve cómo varían las sinusoides a medida que aumenta la frecuencia, desde 100 MHz hasta 1.5 GHz. Estas medidas se repiten para varias potencias de RF. En la siguiente figura se ponen como ejemplo las sinusoides obtenidas con una intensidad de corriente de 25 mA con una señal de 100 MHz y potencias de modulación de -3 dBm y 3 dBm. El resto de las medidas se encuentran en el Anexo IV.



**Figura 3.10:** Distorsión de las sinusoides para 100 MHz

Se puede ver que la sinusoide no se distorsiona al modular con una potencia de RF de -3 dBm, pero cuando aumenta la potencia en 6 dB la distorsión es ya muy notable. Al estar modulando en torno a 25 mA, que es una corriente relativamente próxima a la intensidad umbral (18-20 mA), al modular con una frecuencia relativamente baja de 100 MHz el dispositivo sigue la variación pasando del régimen de emisión espontánea a emisión estimulada: la escasa emisión por debajo del umbral se visualiza en la parte plana del semiciclo negativo de la sinusoide. En frecuencia, este efecto se traduce en un aumento tanto del número de armónicos como de su potencia.

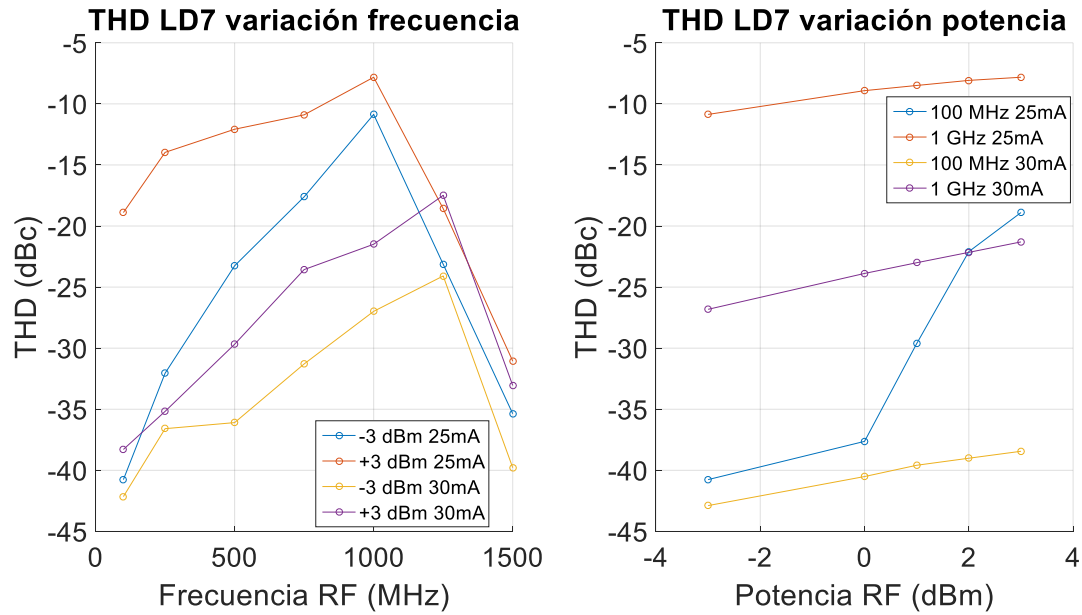
En segundo lugar, se fijan dos valores de frecuencia (100 MHz y 1 GHz) y se varía la potencia de RF en un rango de -3 a +3 dBm. En la **Figura 3.11** se muestra como ejemplo las obtenidas con una intensidad de corriente de 25 mA a ambas frecuencias:



**Figura 3.11:** Distorsión de sinusoides para 25 mA y distintas potencias RF, con 100 MHz (izquierda) y 1 GHz (derecha)

Como se puede ver, en el caso de 1 GHz, incluso para una potencia de RF de -3 dBm existe distorsión, mientras que cuando se trabaja a 100 MHz la señal permanece perfecta. Sin embargo, para 100 MHz y una potencia de RF de 0 dBm la señal sinusoidal comienza a distorsionarse, y para potencias superiores esta distorsión aumenta notablemente.

A partir de estas medidas se obtiene, por un lado, la TDH en función de la frecuencia, y por otro lado, la TDH en función de la potencia de RF. En la **Figura 3.12** se representan los resultados para ambas potencias de RF utilizadas para las 3 intensidades de corriente.

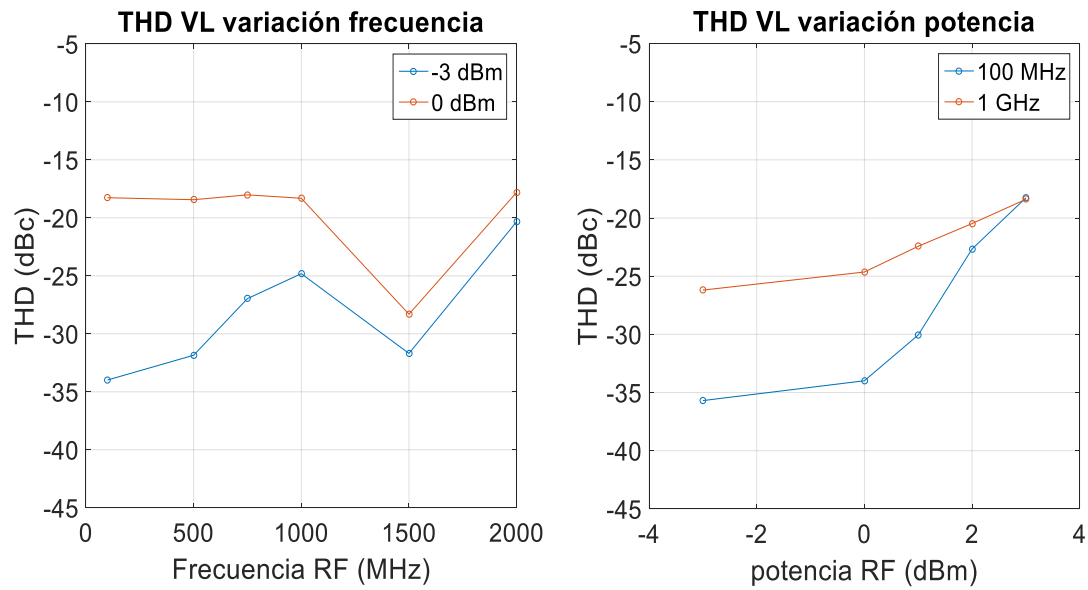


**Figura 3.12:** THD del LD7 en función de la frecuencia (izquierda) y en función de la potencia RF (derecha)

Como se puede ver en la figura de la izquierda, en el caso de trabajar con una corriente de polarización de 25 mA la THD es mayor que cuando se trabaja con 30 mA, y esto es debido a la proximidad del umbral. El máximo que en un caso está en 1 GHz y en el otro en 1.5 GHz puede atribuirse a la dinámica del láser.

Tras realizar estos experimentos y ver que con 25 mA existen problemas de linealidad, se va a escoger una corriente de polarización de 30 mA, garantizando así el funcionamiento en la zona lineal del láser. Además, para modulaciones menores o iguales a -3 dBm la THD es siempre menor que -20 dBc por lo que trabajaremos siempre en estas condiciones.

El mismo procedimiento se ha seguido para el VL. Las correspondientes medidas de las THDs se presentan en las siguientes figuras:



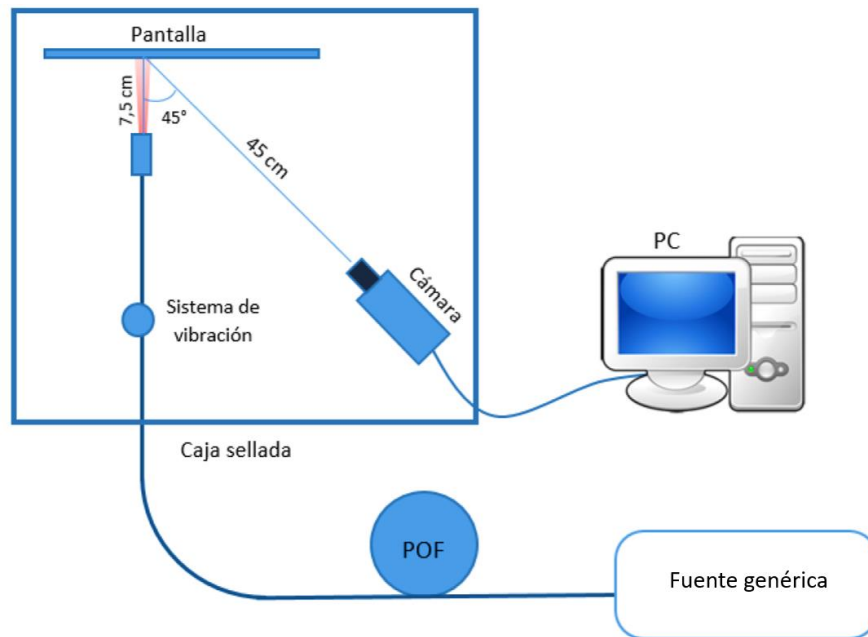
**Figura 3.13:** THD del VL en función de la frecuencia (izquierda) y en función de la potencia RF (derecha)

Las figuras muestran en general mayor distorsión en frecuencias y modulaciones más altas, aunque en la representación en función de la frecuencia, hay un mínimo muy marcado para 1.5 GHz. Las medidas representadas en las gráficas se han realizado en distintas ocasiones, por lo que muestran valores ligeramente diferentes para la misma condición. Por ejemplo, para 1 GHz modulando con RF de 0 dBm encontramos un valor de THD algo mayor que -20 dBc (gráfica de la izquierda) y, sin embargo, en el experimento de variación de la modulación es -25 dBc (gráfica de la derecha). Como hemos dicho, en esta fuente no es posible controlar la mayor parte de los parámetros (intensidad de alimentación, temperatura, etc.). Por ello, para establecer los límites nos quedaremos con el caso más restrictivo y fijaremos la máxima potencia de modulación RF en -3 dBm igual que para el LD7.

#### 3.2.4. Distribución espacial de intensidad

La distribución de intensidad que se introduce en la fibra con una fuente óptica determinada viene dada por las condiciones de inyección que a su vez están condicionadas por las características espaciales del láser (apertura, asimetría, etc.) y la interfaz de la fibra (calidad del corte, tipo de conector, etc.). Como es complicado medir directamente la distribución espacial del láser y, además, esta distribución no es representativa de cómo se redistribuye la luz dentro de la fibra, se asume que una buena aproximación es la distribución espacial de intensidad a la salida de una fibra suficientemente corta [11]. Por ello, para completar la caracterización de los láseres se han medido los patrones de campo lejano (FFP, *Far Field Pattern*) de fibras cortas. El patrón de campo lejano es la distribución de intensidad en un plano lo suficientemente alejado de la punta de la fibra. Este patrón puede considerarse que tiene simetría rotacional y por ello, suele caracterizarse por su perfil radial donde el radio en este caso está relacionado con el ángulo que forma la luz a la salida de la fibra y que, a su vez, está relacionado con el ángulo de propagación mediante su índice de refracción.

El sistema experimental para registro de las imágenes de campo lejano se muestra en la **Figura 3.14**. Para tomar medidas de campo lejano la pantalla debe de situarse a una distancia fija y grande respecto al extremo de la fibra en comparación con el diámetro del núcleo de la misma. En este caso, se coloca la fibra a 7.5 cm de una pantalla de tamaño DIN A4. Las imágenes son capturadas por una cámara refrigerada monocromática de 12 bits colocada con una inclinación de 45° respecto de la fibra, y conectada al ordenador, el cual dispone del software de captación y procesado de imágenes. El entorno de control que permite cambiar algunos parámetros de la cámara y visualizar las imágenes antes de realizar su captura, fue realizado con LabView™ en trabajos anteriores [17] [18] y se describe en el Anexo III. De esta manera, se analiza el patrón de luz incidente reflejado en dicho plano y se mide la distribución de potencia en función de los ángulos con los que sale de la fibra.

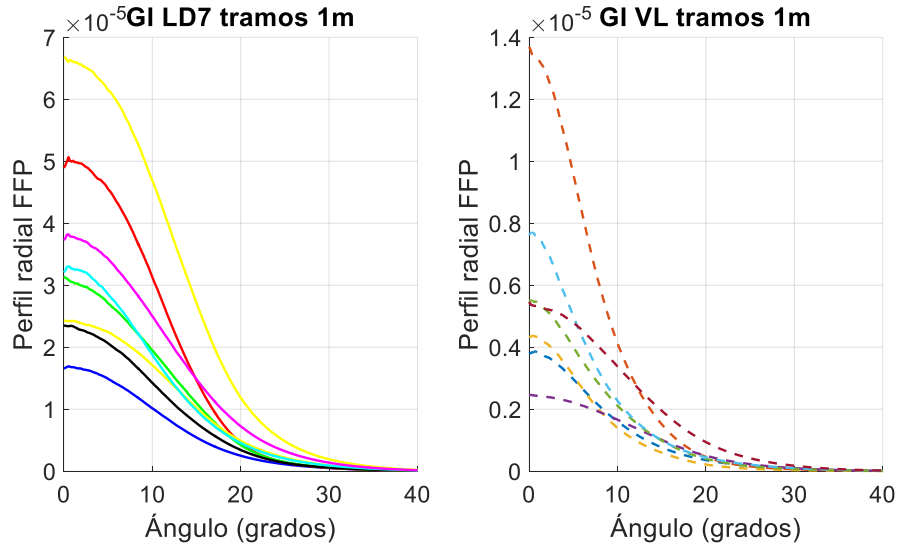


**Figura 3.14:** Esquemático del sistema experimental utilizado para medir patrones de campo lejano [10]

Para cuantificar la variabilidad se hacen medidas con segmentos de fibra diferentes y cortando las puntas con diferentes herramientas. Para cada caso, se toman al menos 15 imágenes durante un tiempo de exposición corto, y se promedian para dar lugar a un solo perfil radial. Para cada serie de imágenes se modifica el tiempo de exposición, aprovechando al máximo el rango dinámico. Además, es de gran importancia evitar la luz del exterior, pues todo aquello que capte la cámara y sea ajeno a la luz procedente de la fibra será ruido añadido al resultado. Para ello, la fibra se introduce a la caja donde está el sistema de captación mediante un pequeño orificio que no permite la entrada de luz exterior. Para reducir el moteado típico de la emisión láser (*speckle*) se hace vibrar la fibra mediante un pequeño motor. El *speckle* es una interferencia granular que existe inherentemente en fuentes coherentes y que degrada la calidad de la señal. Con esta vibración se realiza un promediado sobre las imágenes captadas durante el tiempo de exposición especificado, reduciendo así el ruido en los resultados.

Se han medido las distribuciones de intensidad para la GI-POF cuando se emite con el LD7 y con el VL, que se pueden ver en la **Figura 3.15**. Se usan 4 rabillos diferentes de fibra GI y se toman medidas con cada una de las fuentes, preparando y conectando cada uno de los extremos consecutivamente.



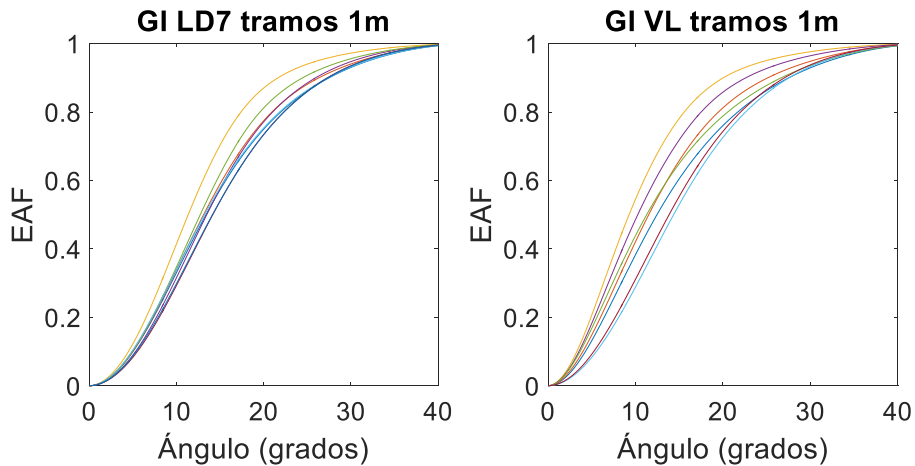


**Figura 3.15:** Perfil radial GI-POF con LD7 (izquierda) y VL (derecha)

Como se puede ver, las medidas tomadas utilizando el VL como fuente de emisión son en general más estrechas que cuando se utiliza el LD7 ya que, al haber una lente para focalizar, el haz es más directivo. Además, existe bastante diferencia en la altura de las distribuciones de intensidad según la fuente utilizada (bastante mayor en el caso del LD7, de acuerdo con sus características), lo que motiva a utilizar distintas escalas de representación en ambos casos. También se puede ver que existe una alta variabilidad en la potencia inyectada incluso con la misma fuente, debido a que la GI-POF es muy sensible a las condiciones de inyección.

Para ver la forma de las distribuciones y compararlas sin tener en cuenta el nivel de potencia inyectada, se obtiene la el flujo angular o EAF (*Encircled Angular Flux*) [19]. Se define como el cociente de un arbitrario flujo de radiación dentro de un ángulo de cono dado, y el flujo total. Se puede calcular mediante una doble integral a partir de la distribución de intensidad en función del ángulo de propagación  $\theta$ , y asumiendo que el patrón de radiación tiene simetría rotacional, como ya se ha considerado.

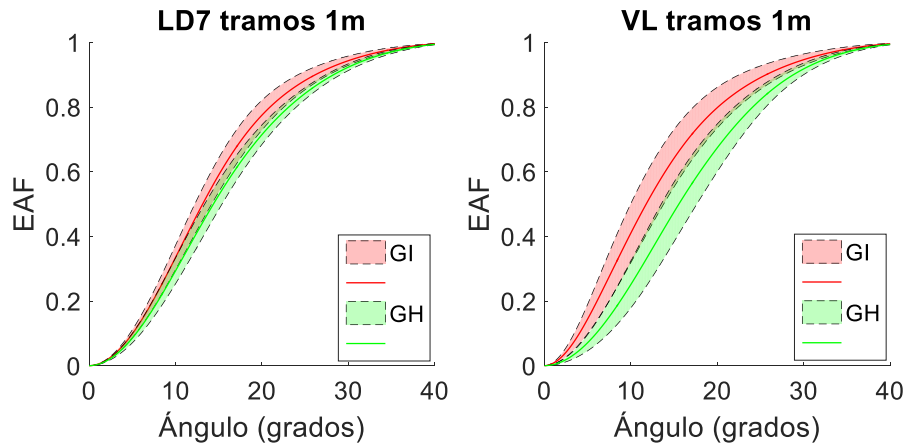
En la **Figura 3.16** se comparan las EAFs obtenidas con fibras de 1 metro de longitud, emitiendo con el LD7 y con el VL.



**Figura 3.16:** EAF GI-POF tramos de 1 metro con LD7 (izquierda) y VL (derecha)

Se ve claramente una mayor variabilidad con el VL y que las distribuciones para el LD7 son más anchas que para el VL. Esto se pone de manifiesto en que las EAFs para esta fuente están desplazadas hacia la derecha (ángulos más altos).

Para verificar si el comportamiento para cada una de las fuentes es específico de la GI-POF o es similar para otras fibras del mismo tamaño y similar apertura pero con distinto perfil de índice, se han obtenido también las mismas medidas para una fibra GH (SI-POF). En la **Figura 3.17** se representa la media y desviación típica para cada una de las fuentes, superponiendo los resultados obtenidos para ambas fibras para facilitar su comparación.



**Figura 3.17:** Comparación de EAF para LD7 (izquierda) y VL (derecha)

Se puede ver cómo, en el caso de la GI-POF, las distribuciones para ambas fuentes son más estrechas angularmente, es decir, en media se alcanza la potencia total antes que para la SI-POF. Este comportamiento es más acusado para el VL ya que para el LD7 las EAFs obtenidas con ambos tipos de fibra no son muy diferentes. Las gráficas muestran también una variabilidad mayor para las medidas con el VL que con el LD7 para ambos tipos de fibra.

### 3.3. Caracterización del sistema completo

Una vez caracterizadas las fuentes y con el SPD-2 de Graviton como detector, se va a caracterizar el sistema completo mediante medidas de tasa de error de bit en función de la velocidad de transmisión o tasa de bit y de la potencia recibida.

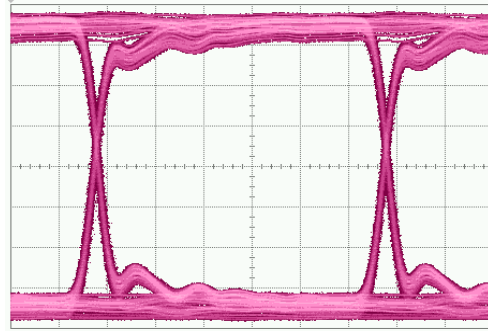
#### 3.3.1. BER

El funcionamiento de un sistema digital se evalúa y caracteriza, entre otros parámetros, con la tasa de error de bit. Indica la precisión con la que el receptor puede determinar el estado lógico de cada bit transmitido. Normalmente, los sistemas de comunicaciones actuales trabajan con un BER de  $10^{-6}$ , lo cual significa que se permite un bit erróneo por cada  $10^6$  bits enviados.

Para determinar la tasa de error de bit se utiliza el OptoBERT OPB3200 de Optellent con entorno de control programado en LabVIEW que se describe en el Anexo II. Se trata de una unidad compacta que incorpora interfaces óptico y eléctrico, generador de patrones y analizador

de errores. Este entorno permite seleccionar distintos PRBS y trabajar con una frecuencia fija o hacer un barrido en frecuencia [20].

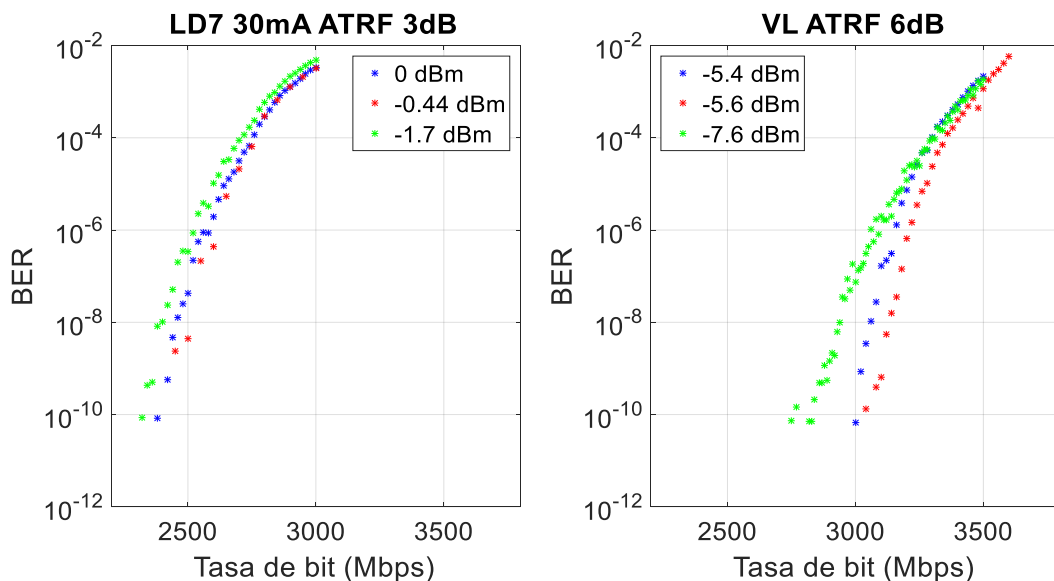
En primer lugar, para controlar la excursión que se introduce en los láseres al modularlos directamente con la salida del OptoBERT, se ha obtenido dicho patrón de salida mediante el osciloscopio. De este patrón, que puede verse en la **Figura 3.18**, se extrae el valor de voltaje pico a pico, que es de 756 mV. La escala es de 100 mV/div.



**Figura 3.18:** Diagrama de Ojo a la salida del OptoBERT

Teniendo en cuenta la conversión a intensidad de corriente y los límites de modulación de intensidad definidos en los apartados anteriores para evitar distorsión, se ha introducido un atenuador de 6 dB para introducir la entrada del OptoBERT en el VL y uno de 3 dB para el LD7.

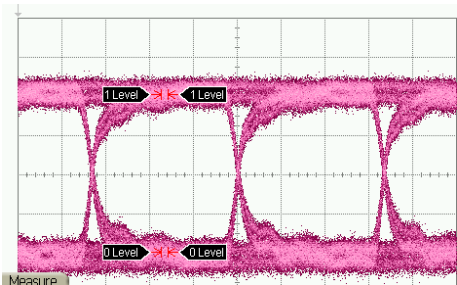
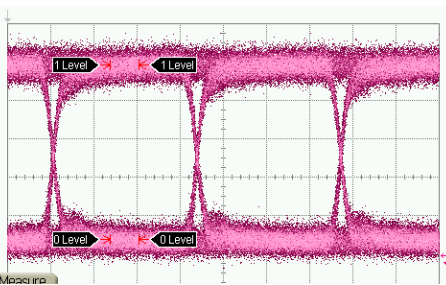
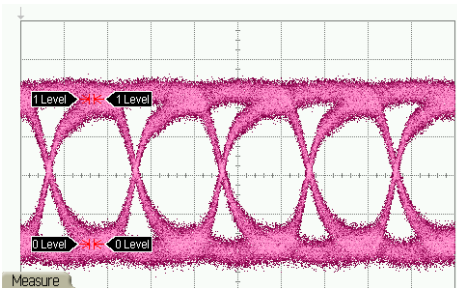
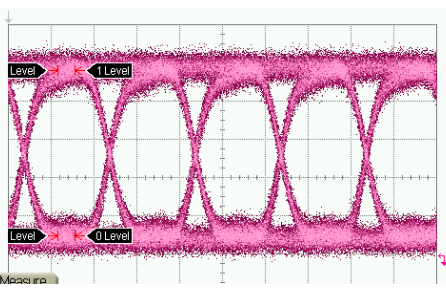
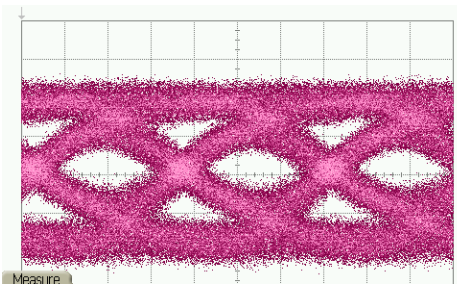
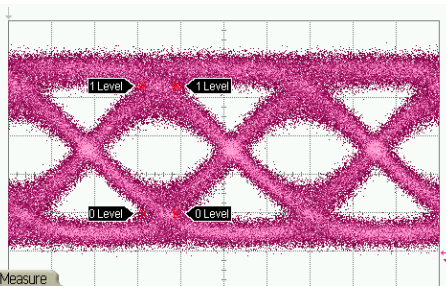
En estas condiciones se ha comparado el comportamiento de las dos fuentes con el detector SPD-2, realizando un barrido en tasa de bit uniando los dos dispositivos con una fibra de 1.5 metros. Dentro de los patrones de datos que permite seleccionar el software de control se ha elegido una longitud del patrón PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) de  $10^{23} - 1$  (PRBS23) para todas las medidas realizadas. Para ambas fuentes se han realizado varias medidas, cambiando las terminaciones de la fibra por lo que la potencia recibida medida con el fotodetector FOTEC antes del barrido, es diferente para cada una de ellas. Estas gráficas se muestran en la **Figura 3.19**, junto con el valor de la potencia recibida en cada caso.



**Figura 3.19:** Barrido en tasa de bit con LD7 (izquierda) y VL (derecha)

Puede verse que, aunque para las potencias más bajas hay un cierto desplazamiento hacia tasas de error mayores, todas las medidas obtenidas son muy similares. El comportamiento del sistema es mejor para el VL incluso aunque emita bastante menos potencia que el LD7. Para un BER de  $10^{-6}$ , se pueden superar los 3 GHz con el VL mientras que, con el LD7 la tasa máxima está en torno a los 2.5 GHz.

Para cada tasa de transmisión se tomaron los correspondientes diagramas de ojo con la máxima potencia recibida posible en el caso del VL. En la **Tabla 3.2** se muestran algunos de ellos y su comparación con los ojos capturados en las mismas tasas con la otra fuente, el LD7.

	LD7 + at RF 3 dB	VL + at RF 6 dB
300 MHz	 <p>Amplitud del ojo: 399.25 mV</p>	 <p>Amplitud del ojo: 54.5 mV</p>
1000 MHz	 <p>Amplitud del ojo: 371.6 mV</p>	 <p>Amplitud del ojo: 51.9 mV</p>
2900 MHz (LD7) 3000 MHz (VL)	 <p>Amplitud del ojo: 272.9 mV</p>	 <p>Amplitud del ojo: 39.6 mV</p>

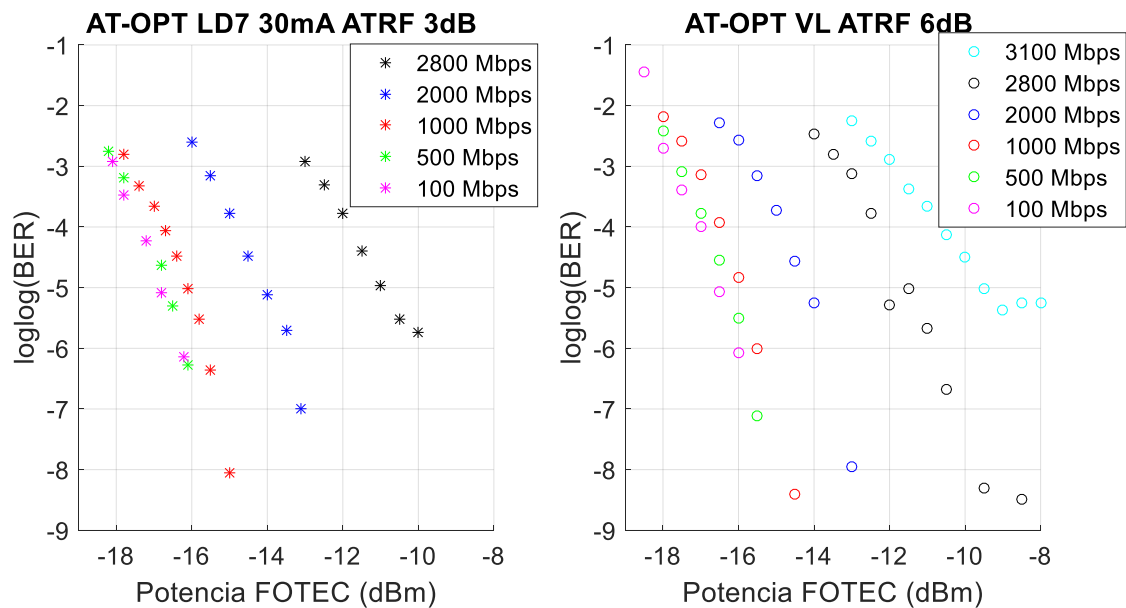
**Tabla 3.2:** Diagramas de ojo del sistema con LD7 y VL

Se puede ver cómo van aumentando los errores a medida que se incrementa la tasa de transmisión. En los dos diagramas superiores la forma de los pulsos es bastante rectangular, aunque en el caso del LD7 ya se comienzan a redondear. Este efecto es consecuente con las limitaciones de la base utilizada para su modulación. A pesar de ello, el ojo del diagrama tiene una amplitud de 399 mV emitiendo con el LD7 mientras que sólo tiene 54 mV si se hace con el VL, debido a su menor potencia de emisión.

En el caso de 1000 MHz el ojo se va cerrando, aunque todavía están lo suficientemente abiertos como para detectar la señal recibida sin demasiados errores. La amplitud de ambos ha disminuido ligeramente con respecto a los 300 MHz, siendo en este caso de 371 mV con el LD7 y 52 mV con el VL. La comparación de la forma de ambos diagramas para las dos fuentes es consecuente con una mayor degradación en el caso del LD7, aunque ya se advierte un redondeo en el diagrama del VL para esta frecuencia.

En cambio, los dos ojos inferiores están más cerrados debido al ruido y a la interferencia intersimbólica. Esto quiere decir que para tasas cercanas y superiores a 3000 MHz la probabilidad de error será bastante mayor. Para esta tasa el sistema basado en el VL se encuentra cerca del BER de  $10^{-6}$  en el que todavía es posible adquirir la señal, pero con un error alto. En 2900 MHz, el BER para el LD7 es superior a  $10^{-3}$  como se refleja en el correspondiente diagrama. La amplitud del ojo ha disminuido notablemente, siendo de 273 mV con el LD7 y 39 mV con el VL.

A continuación se presentan las medidas de BER en función de la potencia óptica recibida para distintas tasas de transmisión, emitiendo con el LD7 y con el VL. Para tomar estas medidas se ha utilizado el atenuador óptico. Para cada tasa elegida, se aumenta la atenuación y se mide por un lado la potencia óptica con el FOTEC, y por otro lado el BER. Estos resultados sirven principalmente para caracterizar el detector SPD-2, ya que nos permiten saber la potencia mínima necesaria para tener un BER determinado, aunque como demuestran las medidas también depende de la fuente.



**Figura 3.20:** BER frente a potencia óptica recibida emitiendo con el LD7 (izquierda) y VL (derecha)

Los resultados obtenidos permiten ver las ventajas del VL frente al LD7, que permite alcanzar tasas más altas, como ya se ha visto en las medidas anteriores. Por otra parte, para tasas por debajo de 1 GHz el comportamiento de ambos sistemas es muy similar y es necesaria una potencia superior a -15 dBm para tener un BER aceptable independientemente de la tasa. Esta limitación se puede relacionar con la sensibilidad del detector.

### 3.4. Conclusiones

Tras llevar a cabo los diferentes estudios y experimentos, se ha descartado el LD40 porque, a pesar de que emite una mayor potencia, su respuesta frecuencial es peor que la de las otras fuentes analizadas. La mejor respuesta frecuencial y menor BER se obtienen con el VL, pero por otro lado, esta fuente emite mucha menos potencia. Por otra parte, el LD7 supone un compromiso entre potencia óptica recibida y respuesta en frecuencia. Por ello, el LD7 parece más indicado para trabajar con fibras de mayor longitud compensando los efectos de la atenuación mientras que en los casos en los que se trabaje con fibras más cortas será más conveniente utilizar el VL ya que presenta la mejor respuesta en frecuencia y permite alcanzar tasas de transmisión más altas con un BER aceptable. De todas formas, antes de realizar cualquier experimento es conveniente realizar pruebas comparativas en las condiciones de trabajo para decidir qué fuente es la más adecuada para dichas condiciones, tal y como se describe en el Capítulo 4.

## Capítulo 4 : Estudio de las propiedades de transmisión de la GI-POF

En este capítulo se describe en primer lugar el protocolo de medida diseñado para la caracterización de las propiedades de transmisión de la GI-POF utilizando una variante del método de corte (*Cut-back Method*) [21]. Durante la realización de todo el experimento se ha tenido especial cuidado en mantener fija la inyección ya que su impacto en los resultados, como se verá en el Capítulo 5, es notable. Por ello, antes de comenzar la serie de medidas, se realizaron varias pruebas con los carretes disponibles (inicialmente 165 metros) para elegir uno de ellos, así como la fuente a utilizar en el experimento basándonos en su respuesta en frecuencia. Los resultados experimentales en función de la longitud de fibra se presentan después, organizados en distintos apartados: potencia recibida, respuesta en frecuencia, distribución de intensidad a la salida de la fibra y tasa de error de bit en función de la tasa de transmisión.

### 4.1. Protocolo experimental

El protocolo de medida utilizado parte de una longitud larga de fibra sobre la que se realiza una serie de medidas de parámetros o funciones de interés. En este caso se obtienen: potencia óptica recibida,  $S_{21}$  para determinar la respuesta en frecuencia, patrón de campo lejano para determinar la distribución angular de intensidad y BER en función de la tasa de bit, con los procedimientos y sistemas experimentales descritos en el Capítulo 3. Después se corta un tramo de dicha fibra y se realiza de nuevo toda la serie de medidas. Se procede así hasta llegar a la menor longitud posible para realizar las medidas. Las medidas con este tramo corto (en este caso, 1 metro) servirán como referencia.

#### 4.1.1. Selección entre VL y LD7

Antes de proceder a realizar el experimento, se ha realizado una comparación de las dos fuentes preseleccionadas, VL y LD7, con el objeto de elegir una de ellas para realizar el experimento completo. Aunque en el Capítulo 3 se ha visto que el VL tiene un mayor ancho de banda, el LD7 aunque emite mayor potencia es potencialmente más adecuado para obtener medidas con fibras de mayor longitud. Debido a que durante el experimento se van a mantener fijas las condiciones de inyección, no es posible realizar las medidas alternando ambas fuentes, ya que al intercambiarlas estaríamos modificando las condiciones de inyección de una longitud a otra.

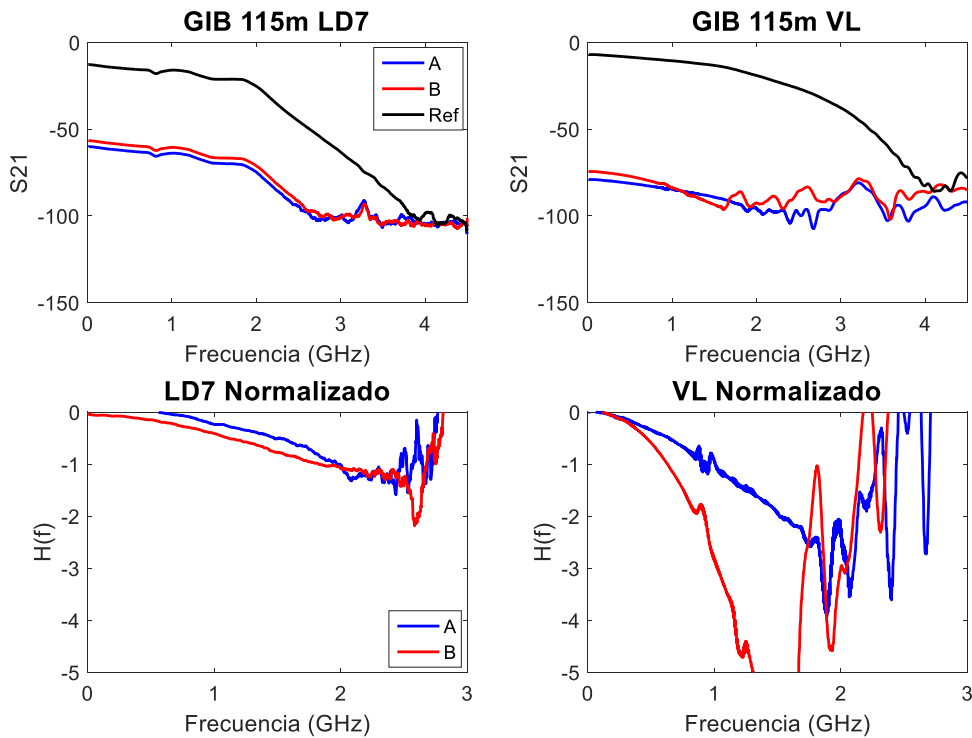
Para determinar qué fuente es la más adecuada para el experimento se ha comparado la respuesta en frecuencia de la fibra utilizando el sistema experimental mostrado en la **Figura 3.4** para obtener el parámetro  $S_{21}$  tanto del carrete como de un tramo de fibra de 1 metro que se utiliza como referencia para dar cuenta de las limitaciones del emisor y transmisor.

La respuesta en frecuencia de una fibra obtenida según el estándar [22] se define como la raíz cuadrada del cociente de parámetros  $S_{21}$  obtenidos en función de la frecuencia para una fibra de longitud  $L$ ,  $S_{21L}(f)$ , y de una fibra suficientemente corta (1 metro),  $S_{211m}(f)$ , que sirve de

referencia para tener en cuenta las limitaciones de la electrónica de los dispositivos opto-electrónicos que intervienen en la medida:

$$H(f) = \sqrt{\frac{S21_L}{S21_{1m}}} \quad [\text{Ecuación 4.1}]$$

Para la longitud de 165 metros de los carretes, las medidas de S21 son muy ruidosas incluso con la fuente LD7 de más potencia, por lo que se decide cortar hasta 115 metros, que se toma como longitud inicial para el experimento. Con esta longitud se han obtenido las respuestas en frecuencia para comparar el comportamiento de las dos fuentes y seleccionar una de ellas. Los resultados se pueden ver en la **Figura 4.1**.



**Figura 4.1:** Comparación de S21 y respuesta frecuencial para 115 m con LD7 y VL

Aunque, como se ha visto en el capítulo anterior, la respuesta en frecuencia obtenida con la fuente VL es más ancha y plana que la que se obtiene con el LD7, la menor potencia de aquella hace que las medidas de fibras largas sean mucho más ruidosas. Esto, que ya se aprecia en las gráficas de la parte superior donde se muestran las medidas de S21 para las dos puntas del carrete y la referencia, se ve aún más claramente en los gráficos de abajo donde se representan las respuestas en frecuencia. Para ilustrar esto, se ha mantenido en la representación la mayor parte del rango de frecuencias medido. Las gráficas muestran, además, diferencias en la respuesta en frecuencia dependiendo de la fuente utilizada con una mayor degradación en el caso del VL que incluso presenta diferencias dependiendo de la punta, que se suponen debidas a la inyección y que se estudiarán más a fondo en el último capítulo de esta memoria.

De esta forma, se elige el LD7 con una corriente de polarización de 30 mA para realizar el experimento de corte, fijando la temperatura de trabajo en 22°C.



#### 4.1.2. Protocolo del método de corte

El experimento comienza conectando el extremo A del carrete de fibra a la fuente LD7. Esta conexión determina las condiciones de inyección y una vez realizada, no se modificará hasta terminar el experimento completo, es decir, hasta llegar a la fibra de 1 metro. Por ello, siempre se corta desde el extremo conectado al detector.

El protocolo de medida para cada longitud de fibra es el siguiente:

1. Medida potencia óptica con el FOTEC
2. Medida de S21 con el VNA [3.2.2]
3. Medida de FFP [3.2.4]
4. Medida de BER (en los casos posibles) [3.3.1]
5. Registro de diagramas de ojo en varias tasas

Para cuantificar la variabilidad, las medidas 1 y 2 se repetían varias veces cortando el extremo al detector con distintas herramientas [Anexo I], recolocando el conector, y finalmente puliendo.

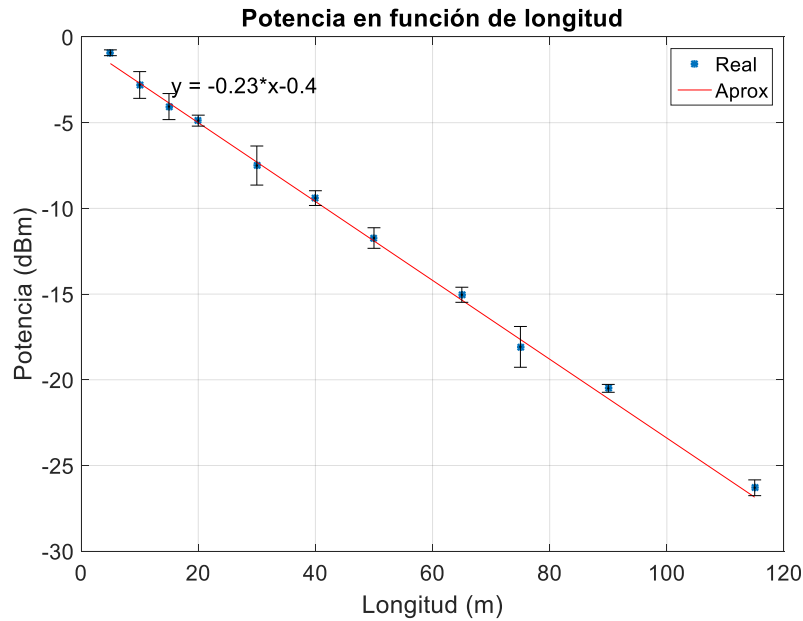
Una vez realizadas todas estas medidas, se corta el tramo correspondiente y se repite el protocolo con la siguiente longitud. Se han analizado las siguientes longitudes: 115m, 90m, 75m, 65m, 50m, 40m, 30m, 20m, 15m, 10m, 5m y 1m.

## 4.2. Resultados

#### 4.2.1. Potencia óptica recibida

Como se ha explicado, para cada longitud de fibra estudiada se realizaban las medidas 1 y 2 al menos 5 veces cambiando la terminación en el extremo final de la fibra utilizando distintas herramientas y/o pulido tal y como se describe en el Anexo I.

Las medidas de potencia realizadas con el FOTEC promediadas para cada longitud se representan en la **Figura 4.2** en función de la longitud con su desviación estándar junto con una recta ajustada. La pendiente de dicha recta será el valor de la atenuación en dB/m.



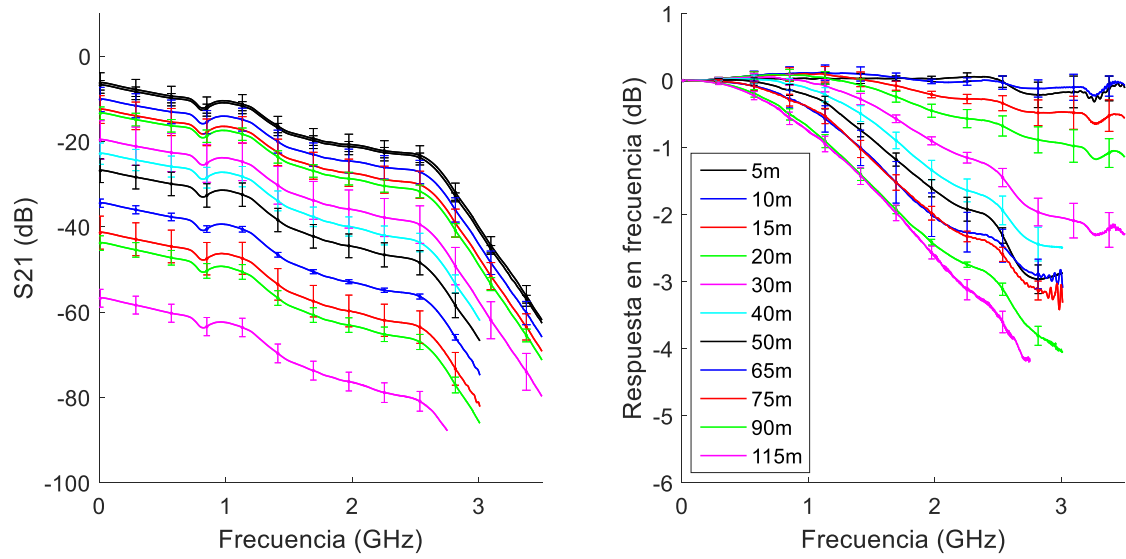
**Figura 4.2:** Potencia óptica en función de la longitud

Como se puede ver, el valor de la pendiente de la recta ajustada a los resultados es de -0.23, lo que quiere decir que la atenuación de la fibra del carrete utilizado en el experimento de cut-back es de 0.23 dB/m, que está en el rango de valores típicos para este tipo de fibra.

#### 4.2.2. Respuesta en frecuencia de la fibra

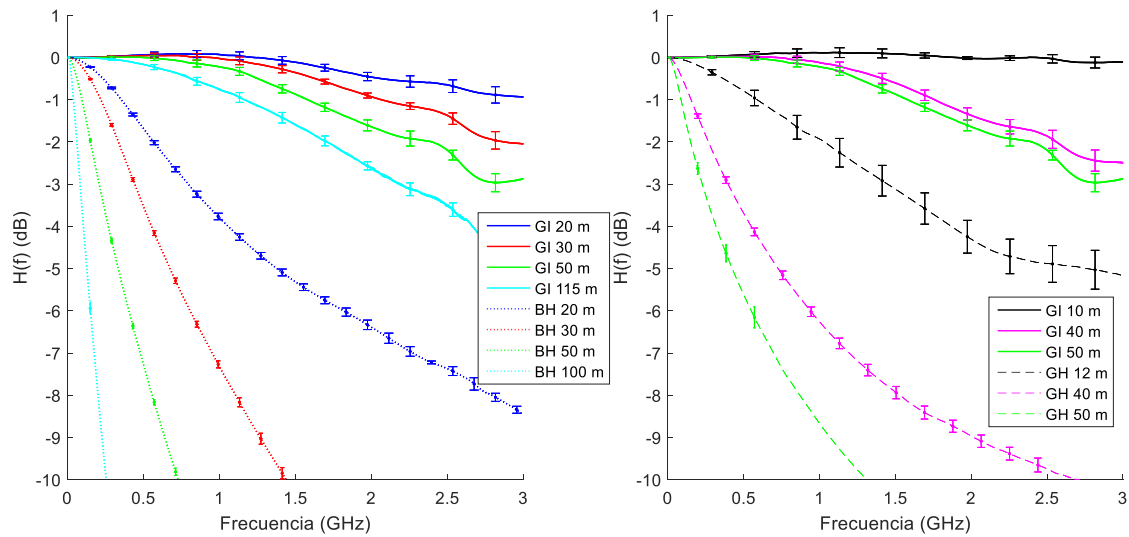
Como se explica en el apartado 3.2.2, el S21 para cada tramo de fibra se mide con el VNA configurado como se especifica en el Anexo III. Los resultados se muestran en la **Figura 4.3**, a la izquierda el S21 para cada longitud junto con la media y desviación estándar, y a la derecha la media de la respuesta en frecuencia normalizada:  $H(f)$ , con su desviación estándar, obtenida a partir de las de la medida y la referencia mediante la **Ecuación 4.1**.

Aunque se han obtenido todas las medidas hasta 4.5 GHz (la máxima frecuencia posible con el VNA) sólo se representa la curva hasta la frecuencia en la que el nivel de ruido es tolerable. Esta frecuencia depende de la longitud de fibra y es menor para las longitudes más largas en las que las que se pone de manifiesto la elevada atenuación de este tipo de fibra. Por otra parte, la mayor variabilidad y las oscilaciones visibles en todas las respuestas en frecuencia son debidos a las limitaciones impuestas por la base de control del láser que, como muestra la representación del S21, producen una caída abrupta a partir de 2.75 GHz. El código de color que distingue las distintas longitudes mostrado en la leyenda de la derecha para la respuesta en frecuencia es el mismo que para el S21 representado a la izquierda.



**Figura 4.3:**  $S_{21}$  (izquierda) y  $H(f)$  (derecha) de las distintas longitudes del cut-back

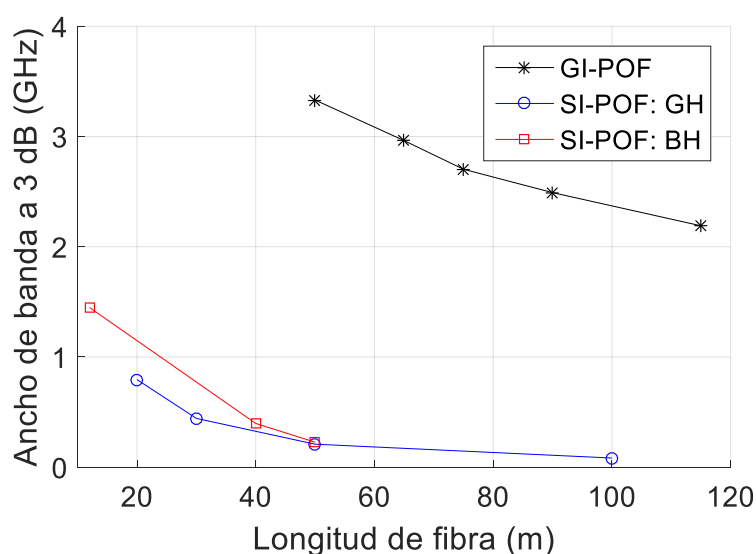
A la derecha, se ve cómo el  $S_{21}$  se desplaza hacia abajo al aumentar la longitud de fibra debido a la atenuación. A la izquierda, en la representación de la respuesta en frecuencia se observa con mayor claridad que ésta se va degradando conforme aumenta la longitud. Para valorar esta degradación, en la **Figura 4.4** se comparan algunas de las medidas de este experimento con las obtenidas para fibras de salto de índice utilizando el mismo sistema de caracterización. Estas fibras, fabricadas por Mitsubishi, son la fibra BH, más resistente a la temperatura pero con peores prestaciones [23], y la GH que ya se ha utilizado antes en la caracterización de las fuentes.



**Figura 4.4:** Comparación GI-BH (izquierda) y GI-GH (derecha)

En ambos casos, puede verse que la respuesta en frecuencia se degrada mucho más rápidamente al aumentar la longitud de las fibras de salto de índice. En la gráfica de la izquierda, podemos ver que la respuesta para 115 metros de fibra GI-POF está bastante por encima incluso de la obtenida con sólo 20 metros de BH. En la gráfica derecha se ve que la respuesta en frecuencia de la GI-POF de 10 metros es prácticamente plana, mientras que la de la fibra GH de 12 metros tiene una caída bastante más abrupta.

Para cuantificar mejor este efecto, se ha determinado el ancho de banda a 3 dB para las longitudes de GI-POF en las que esto ha sido posible, ya que en las frecuencias altas hay bastantes oscilaciones que no permiten determinarlo de forma fiable. Estos valores, que se muestran en la **Figura 4.5** permiten ver que, incluso para la fibra de 115 metros, el ancho de banda no baja de 2 GHz. Hay que notar que en el experimento inicial realizado para elegir la fuente con los 115 metros, las respuestas en frecuencia obtenidas para esta fuente no llegaban a bajar a -3 dB, lo que se asume que es debido a que la inyección con las que se realizaron esas primeras medidas era diferente, ya que la fibra se volvió a preparar y a conectar a la fuente al inicio de esta serie de experimentos. En esta misma figura se representan también los anchos de banda obtenidos de las respuestas en frecuencia de las SI-POFs representadas en la figura anterior, lo que permite apreciar el superior comportamiento de la GI-POF.

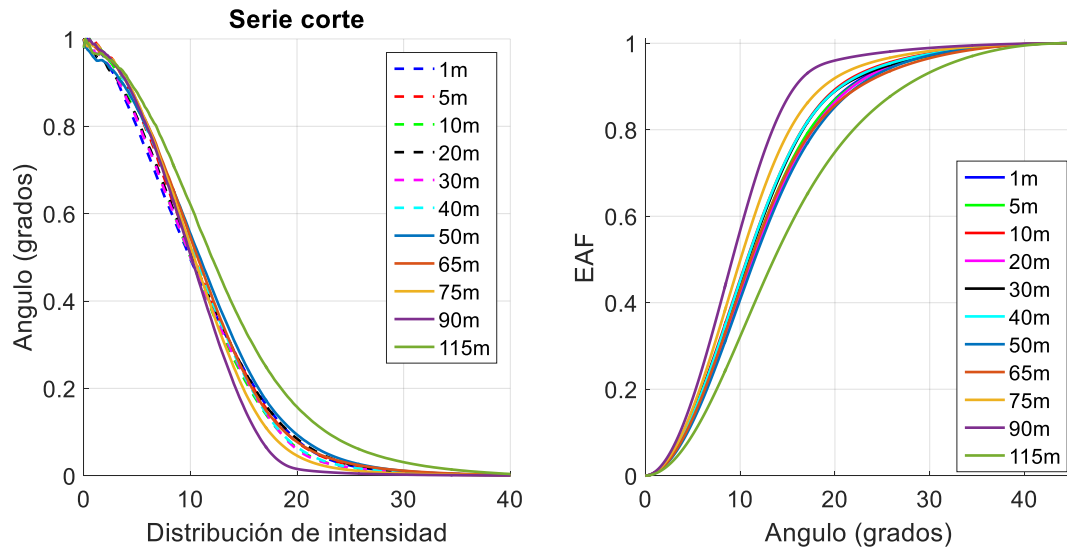


**Figura 4.5:** Comparación de Anchos de banda de GI-POF y SI-POF en función de la longitud

#### 4.2.3. Distribución de intensidad

Se han registrado las imágenes del patrón del campo lejano para cada longitud utilizando el sistema experimental y el método descritos en el Capítulo 3 [3.2.4].

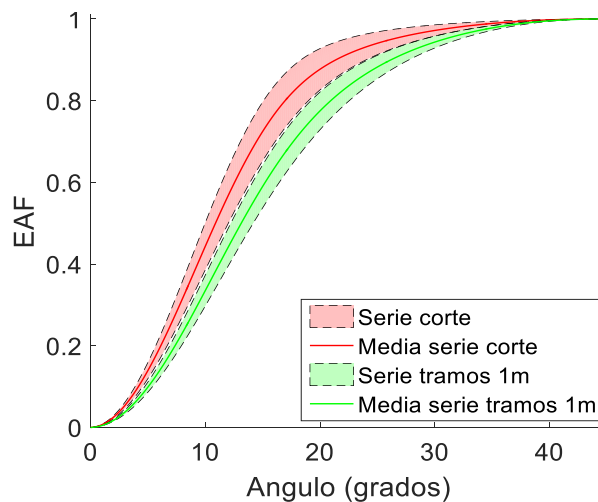
En el gráfico de la izquierda de la **Figura 4.6** se representan las medidas de distribución de intensidad y las EAFs obtenidas a partir de ellas de la misma forma que se describió en el Capítulo 3. Al haber fibras de longitudes muy variadas (desde 115 metros hasta 1 metro), el valor de la intensidad, una vez corregido en función del tiempo de exposición, es muy diferente, por lo que solo se pueden comparar normalizadas o utilizando la EAF obtenida a partir de ellas. Estas dos curvas se representan para todas las longitudes:



**Figura 4.6:** Distribuciones de intensidad (izquierda) y EAF (derecha) de la serie de corte

En ambas representaciones se puede ver que la mayor parte de las medidas son similares excepto en los casos que corresponden a 90 y 115 metros, y que son la más estrecha y la más ancha respectivamente. Esto indica que no hay una correlación entre anchura angular y longitud de fibra. Este resultado es consistente con que el principal determinante de la forma de la distribución de intensidad es la forma de la inyección que, en el experimento de corte, se ha mantenido invariante. Las diferencias entre medidas obtenidas para distintas longitudes se pueden atribuir a la colocación y a la terminación de la punta de la fibra enfrentada a la pantalla. Todas las imágenes promediadas para cada longitud se han tomado con la misma terminación, que es la correspondiente a la última de las medidas de respuesta en frecuencia y potencia y que se han obtenido alternando distintas herramientas para terminar la fibra, sin un orden particular.

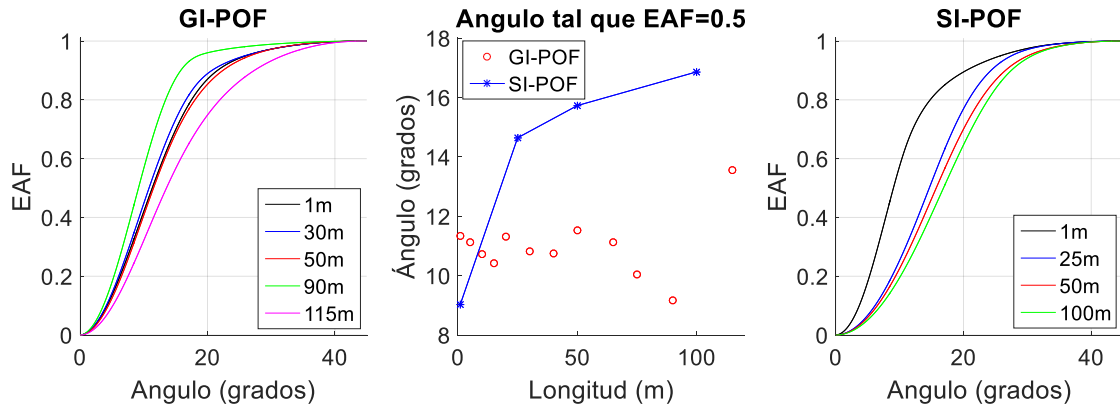
Para confirmar este hecho, se representan en la **Figura 4.7** la media y desviación de las medidas obtenidas para tramos de 1 metro en el Capítulo 3, junto con la media y desviación de las obtenidas en la serie del experimento de corte para longitudes de 1 metro a 115 metros. La gráfica muestra que en promedio las distribuciones obtenidas en la serie de corte son más estrechas que el promedio de las obtenidas con 1 metro de fibra.



**Figura 4.7:** Media y desviación típica de la serie de corte y serie de tramos de 1 metro

Este comportamiento difiere respecto del observado en las fibras de salto de índice, por la cual al transmitirse la luz por la fibra se produce acoplo modal debido a la difusión que normalmente introduce intensidad en ángulos más altos. De esta forma, para longitudes largas (en torno a los 100 metros) se alcanza la distribución modal de equilibrio que ya no se modifica en forma sino sólo en amplitud debido a la atenuación. Por ello, aunque siempre depende de la apertura de la fuente y la forma de inyección, la distribución de intensidad se va ensanchando a medida que se transmite por mayor longitud de fibra. Esto se refleja en el patrón de campo lejano y por tanto en su perfil radial, que sirve como estimación de la distribución de intensidad a la salida de la fibra.

Este hecho se puede corroborar comparando las EAFs obtenidas para la fibra BH en 4 longitudes: 1m, 25m, 50m y 100m, que se muestran en la siguiente figura en la gráfica de la izquierda. Para facilitar la comparación, las EAFs obtenidas en el experimento de corte a longitudes similares se representan a la derecha. En el centro de la figura se han representado las anchuras en grados de las EAFs cuando estas toman el valor 0.5 en función de la longitud. En esta representación queda claro que en la SI-POF el ensanchamiento de la distribución se incrementa con la longitud de fibra, cosa que no ocurre para la GI-POF.

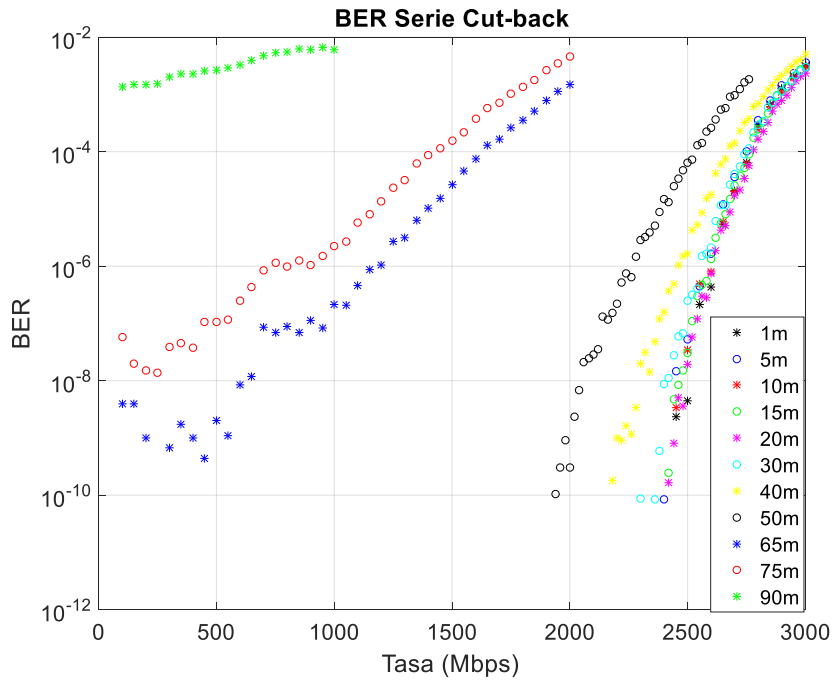


**Figura 4.8:** Comparación de GI-POF con SI-POF mediante EAF

Los resultados sugieren que la GI-POF no sigue el mismo comportamiento que la SI-POF y se puede concluir que la distribución de intensidad a la salida de la fibra es prácticamente independiente de la longitud de esta y que viene determinada principalmente por cómo son las terminaciones de la fibra tanto el extremo de inyección que se acopla a la fuente de luz como el enfrentado a la pantalla donde se forma la imagen del FFP.

#### 4.2.4. BER

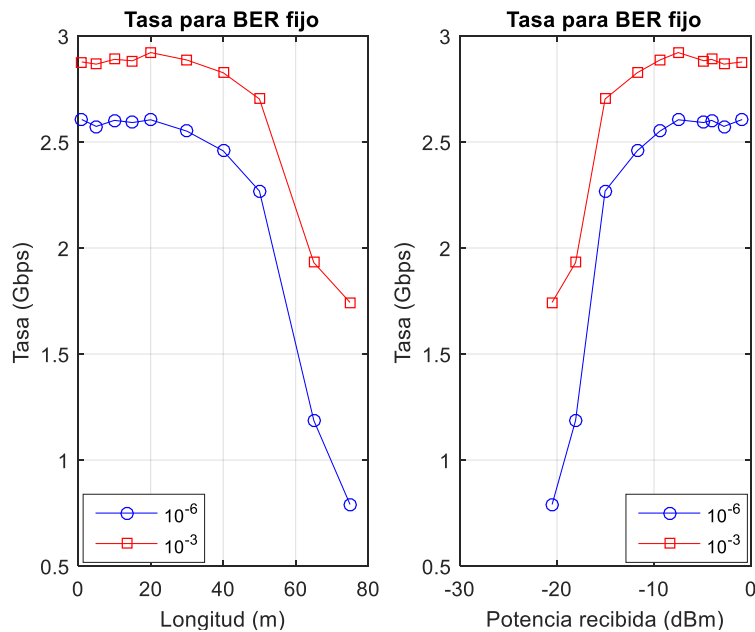
Para medir la tasa de error de bit se ha utilizado de nuevo el OptoBERT. Para 115 metros no ha sido posible medir ya que no se sincronizaba. Para el resto de longitudes se ha obtenido la medida de BER en función de la tasa de transmisión y se han registrado diagramas de ojo para varias tasas. Las curvas de BER frente a tasa de transmisión se representan en la **Figura 4.9**.



**Figura 4.9:** BER en función de tasa de bit emitiendo con LD7

Como se puede ver, hasta 30-40 metros el comportamiento del sistema no se degrada, y las curvas de BER en función de la tasa coinciden. A partir de 30 metros las curvas comienzan a desplazarse hacia tasas más bajas y particularmente, entre 50 y 65 metros hay una degradación importante. Hasta 75 metros todavía es posible llegar a transmitir a 1 Gb/s con errores del orden de  $10^{-6}$ . Sin embargo, en la siguiente longitud analizada, 90 metros, ya no es posible transmitir por debajo de  $10^{-3}$ .

En la **Figura 4.10** se puede visualizar mejor la capacidad de transmisión de la GI-POF representando la tasa de bit para un BER fijo en función de la longitud de la fibra.

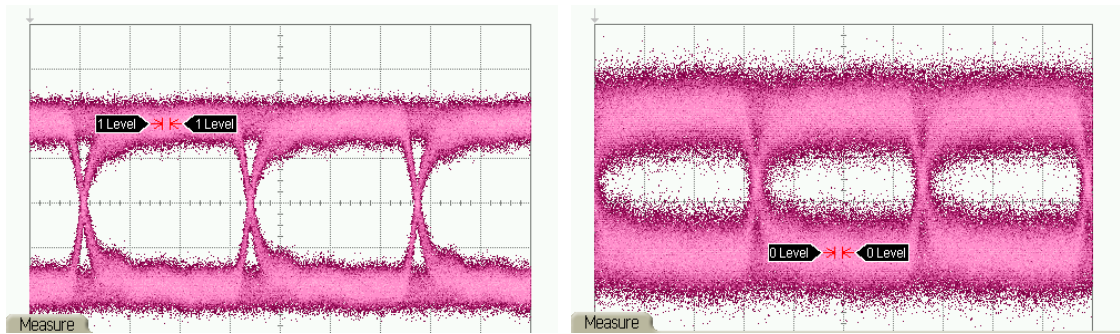


**Figura 4.10:** Tasa para BER fijo

Como al aumentar la longitud de fibra disminuye también la potencia que llega al detector debido a la alta atenuación, se han representado también las tasas en función de la potencia óptica recibida medida en cada caso con el FOTEC. Se ha elegido el valor de  $10^{-6}$  ya que es un valor típico para garantizar comunicación, y el de  $10^{-3}$  que implica que, después de la recepción, existe un sistema de corrección de errores (FEC) que disminuye la tasa de error.

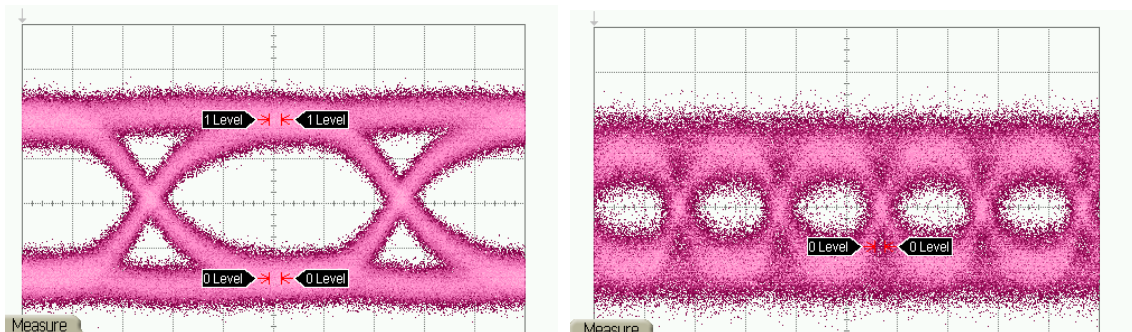
#### 4.2.5. Diagramas de ojo

Se han registrado diagramas de ojo con cuatro tasas diferentes para cada longitud de fibra del experimento salvo 115 metros, todos ellos con un atenuador de RF de 3 dB para mantener la salida en el rango medible del osciloscopio. Estas tasas han sido 300 MHz y 1000 MHz para todas las longitudes a partir de 65 metros, y otras dos tasas más altas (normalmente cercanas a 2500 MHz y 2900 MHz) para longitudes menores. En las capturas de la **Figura 4.11** se muestran los ojos para 300 MHz, y en la **Figura 4.12**, para 1000 MHz:



**Figura 4.11:** Diagrama de ojo para 300 MHz en 50 m (izquierda) y 65 m (derecha)

Se observa que con 300 MHz los ojos se mantienen abiertos (con una amplitud de 38.4 mV) hasta los 50 metros de longitud con tasas de error de 0 (**Figura 4.9**). Para tramos más largos la tasa de error de bit se incrementa, aunque se mantiene por debajo de  $10^{-6}$ . El diagrama de ojo para 65 metros (con 12 mV de amplitud) revela que es la presencia de ruido (aumento de la anchura del nivel superior e inferior) debido a la reducida amplitud y no la interferencia intersimbólica (anchura del cruce vertical) lo que causa el error.



**Figura 4.12:** Diagrama de ojo para 1000 MHz en 50 m (izquierda) y 65 m (derecha)

Como se puede ver, con 1000 MHz el diagrama de ojo para 50 metros corresponde a una transmisión sin error (con una amplitud de 35.4 mV), mientras que para 65 metros (7.2 mV de

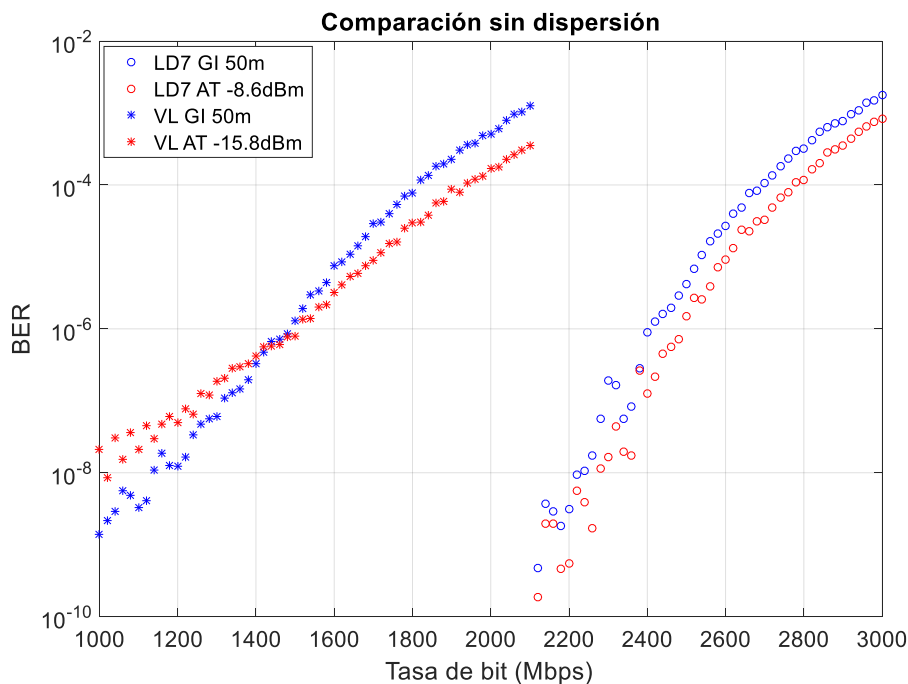


amplitud) aparece ruido e interferencia intersimbólica, por lo que el receptor ya no será capaz de determinar con certeza el estado lógico del bit transmitido y el aumento del BER es considerable. Entre estas dos longitudes se observó un cambio drástico de comportamiento en la medida de BER frente a tasa que se refleja con estas medidas.

### 4.3. Experimento de control

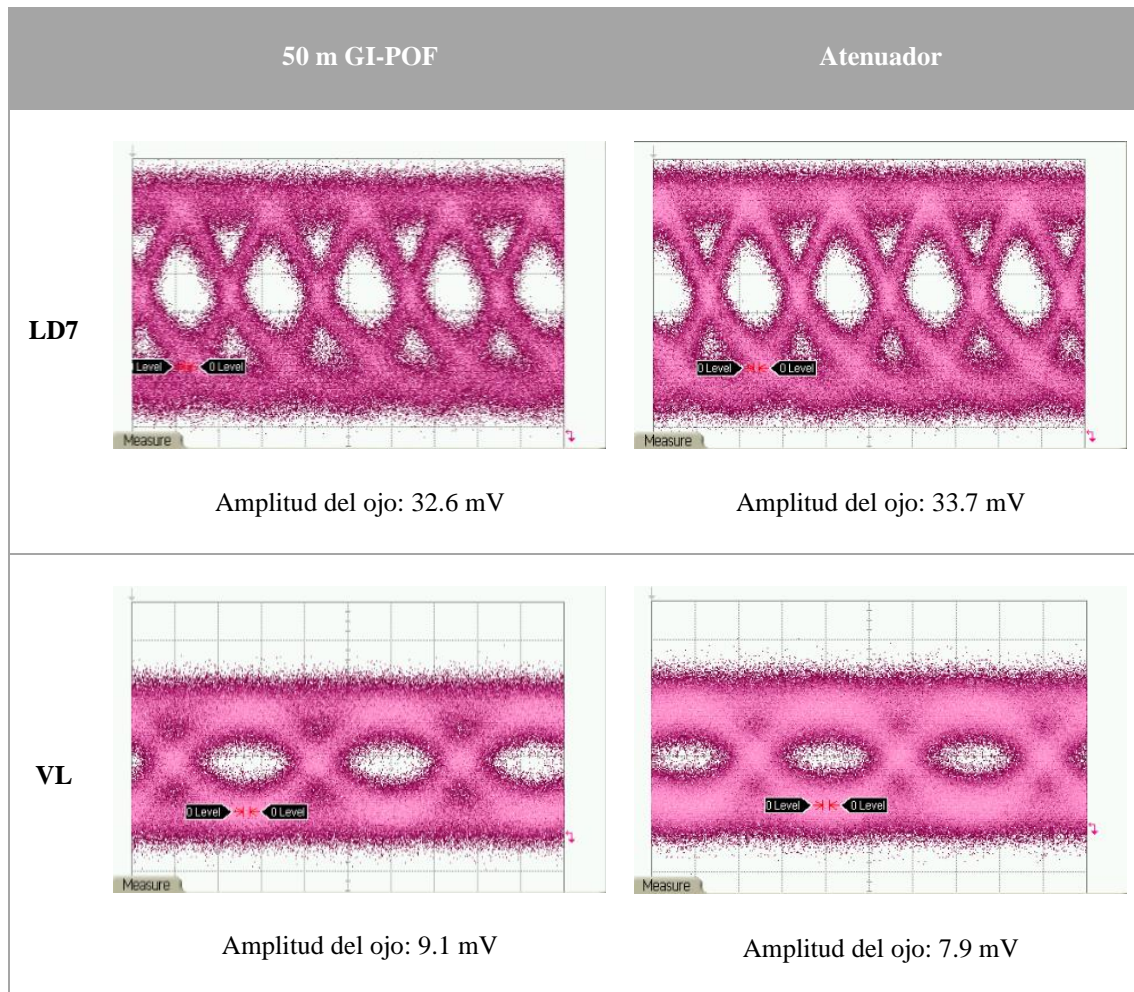
Al comparar las curvas de tasa máxima para un BER fijo representadas en función de la longitud (**Figura 4.10**, izquierda) con la **Figura 4.5**, se ve que el ancho de banda de la fibra disminuye de forma bastante más suave que la tasa de transmisión para BER fijo. La gráfica que representa la variación de la tasa de transmisión con la potencia óptica (**Figura 4.10**, derecha) muestra una forma parecida, señalando que el punto en el que ésta decrece abruptamente se da a partir de que la potencia es menor que -15 dBm, valor muy similar a la sensibilidad del detector determinada en el Capítulo 3.

Por este motivo, se ha testeado la hipótesis de que el efecto predominante en la degradación de la transmisión con GI-POF es la atenuación más que la dispersión. Para ello se ha medido con las dos fuentes el BER en función de la tasa de bit para una fibra de 50 metros y se ha comparado con la misma medida tomada con el atenuador óptico fijando su posición para que, conectando la salida del SPD-2 al osciloscopio, tengamos el mismo voltaje en ambos casos. El atenuador óptico al estar fabricado con un tramo de fibra corto (2 metros) no introduce dispersión, sólo atenuación. El ajuste de potencia se ha realizado utilizando el osciloscopio porque, debido a la distinta aceptación del fotodetector FOTEC y del SPD-2 y a que la distribución espacial es mucho más amplia para el atenuador que para la GI-POF, puede haber diferencias notables entre ambas medidas de potencia con el fotodetector. De esta forma, se asegura que el SPD-2 está recibiendo la misma potencia óptica en ambos casos y que la intensidad de corriente a la salida es la misma. Los resultados para ambas fuentes en las dos condiciones se muestran en la **Figura 4.13**.



**Figura 4.13:** Comparación LD7 y VL sin dispersión

Los resultados son similares con 50 metros de fibra y sin fibra (atenuador) cuando la potencia recibida es la misma, lo que demuestra que la degradación en la transmisión es debida a la atenuación y no a la dispersión. Esto se confirma con los diagramas de ojo representados en la **Figura 4.14**, que son prácticamente idénticos en las dos condiciones para las dos fuentes.



**Figura 4.14:** Diagramas de ojo de las dos fuentes (arriba LD7, abajo VL) con 50 m de GI-POF (izquierda) y atenuador (derecha)

#### 4.4. Conclusiones

En este capítulo se han estudiado las propiedades de transmisión de la GI-POF en función de la longitud, y se han comparado con las de otras fibras. Como conclusiones del experimento de corte en la GI-POF cabe destacar, por un lado, el gran ancho de banda, siendo mayor de 2 GHz incluso para la longitud máxima estudiada (115 m) y siendo prácticamente plana para longitudes menores a 20 metros. Por otro lado, es posible transmitir a 1 Gbps hasta longitudes de 75 metros con un BER de  $10^{-6}$ . Además, al igual que ocurre con la SI-POF, el efecto predominante en la degradación de la transmisión al aumentar la longitud es la atenuación más que la dispersión, pero a diferencia de lo que ocurre con la SI-POF, la anchura de la distribución angular de intensidad a la salida de la fibra es independiente de su longitud, y la respuesta en frecuencia en función de la longitud de la GI-POF se degrada de forma más lenta.

## Capítulo 5 : Influencia de la inyección en las propiedades de transmisión de la fibra GI-POF

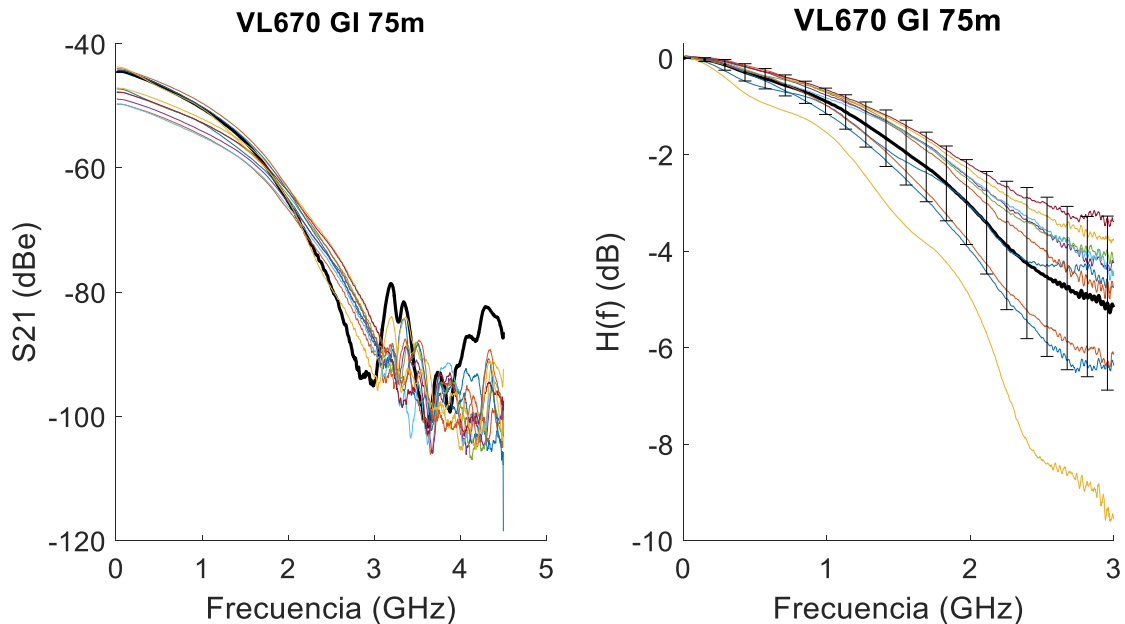
En este capítulo se ha investigado la causa de los cambios de la respuesta en frecuencia al modificar las condiciones de inyección que se han obtenido al hacer algunas de las medidas de caracterización de las fibras y que ya se observó en un trabajo anterior [10].

Por ello, en este capítulo han utilizado a utilizar las dos fuentes caracterizadas más a fondo en el Capítulo 3 (LD7 y VL) para obtener la respuesta en frecuencia y la distribución de intensidad en dos tramos de fibra de 50 y 75 metros respectivamente. Como ambas fuentes son láseres con una alta directividad, se han medido también dichas propiedades modificando su apertura mediante el uso de un rabillo corto de fibra de salto de índice. Después, se realizó un experimento para analizar la posible correlación entre la anchura de la distribución de intensidad y la respuesta en frecuencia. Por último, se van a comparar los resultados obtenidos puliendo o no las terminaciones de la fibra.

### 5.1. Caracterización con inyección directa

Se han obtenido las respuestas en frecuencia y distribución de intensidad con inyección directa mediante el procedimiento descrito en los capítulos anteriores. En el caso de las respuestas en frecuencia se han tomado al menos 5 medidas cambiando la conexión de la fibra a la fuente. Se han realizado distintos cortes, pero sin pulir la fibra.

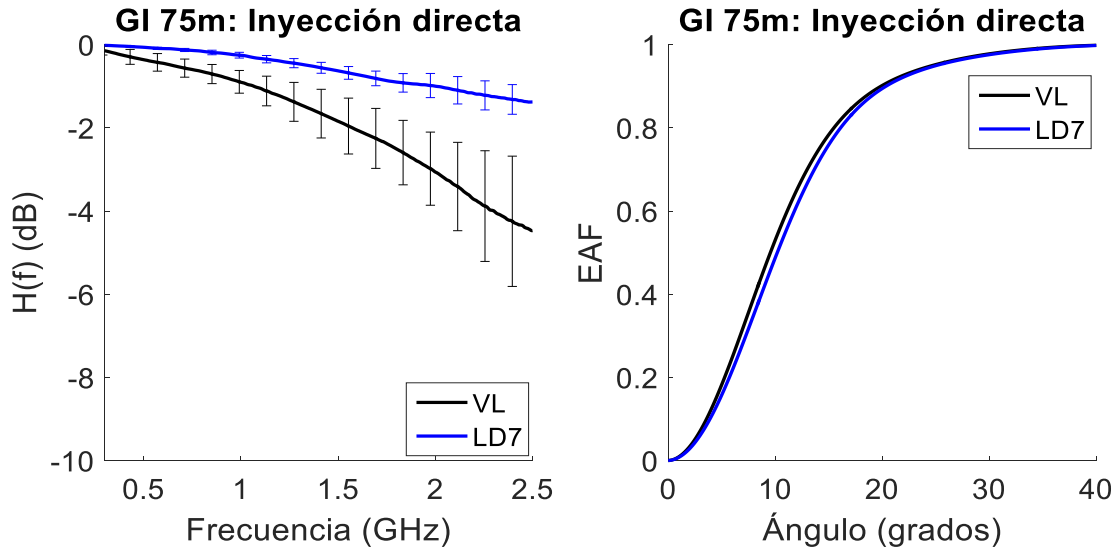
En la **Figura 5.1** se muestran las medidas obtenidas para una fibra de 75 metros inyectando directamente con la fuente VL, que ilustran la gran variabilidad obtenida en las medidas de la respuesta en frecuencia en estas condiciones.



**Figura 5.1:**  $S_{21}$  (izquierda) y Respuesta frecuencial (derecha) de GI-POF 75 m con VL

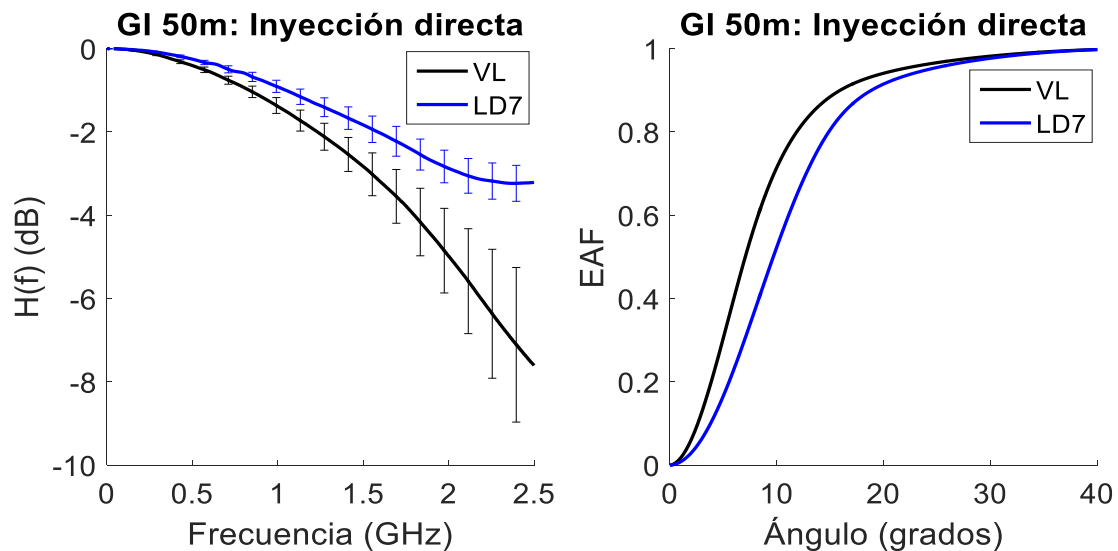
Hay que notar que, con esta fuente y en estas condiciones, el ancho de banda de la respuesta promedio es menor (2.17 GHz) que el obtenido para la misma longitud de fibra en el experimento de corte con el LD7 (2.7 GHz).

La figura siguiente muestra la comparación de las respuestas en frecuencia y las EAFs para ambas fuentes:



**Figura 5.2:** Respuesta frecuencial (izquierda) y EAF (derecha) de GI-POF 75 m con VL y LD7

Las gráficas muestran considerables diferencias en la respuesta en frecuencia: peor comportamiento y mayor variabilidad en el caso de la fuente VL, mientras que las EAFs son muy similares, sólo un poco más estrecha la del VL. La respuesta en frecuencia media obtenida para el LD7 en este caso es algo más ancha que la obtenida en el experimento en serie y no puede obtenerse el ancho de banda a 3 dB. Estas diferencias se pueden atribuir a diferencias en la inyección. Se repite el mismo experimento con una fibra más corta, de 50 metros, y se muestran los resultados en la **Figura 5.3**.

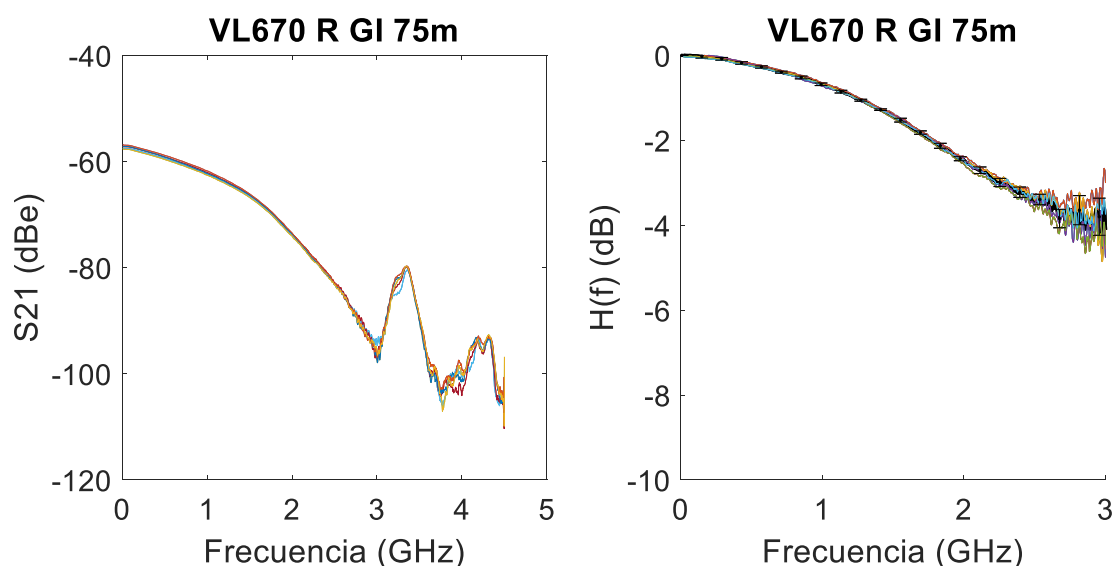


**Figura 5.3:** Respuesta frecuencial (izquierda) y EAF (derecha) de GI-POF 50 m con VL y LD7

Las gráficas muestran diferencias aún mayores entre fuentes, tanto en la respuesta en frecuencia como en la EAF. La EAF obtenida con el LD7 es bastante similar en las dos longitudes de fibra, pero con el VL es notablemente más estrecha en el caso de 50 metros. La variabilidad en las respuestas en frecuencia es muy alta y, de nuevo, bastante mayor para el VL. Curiosamente, la respuesta en frecuencia es más baja que para 75 metros en ambas fuentes como revelan los valores medios del ancho de banda a 3 dB que son de 1.58 GHz para el VL y 2.62 GHz para el LD7. En el experimento en serie con el LD7 en 50 metros se obtuvo ancho de banda mayor, 3.33 GHz. Además, en dicho experimento, un aumento en longitud suponía una reducción (aunque normalmente no muy grande) de ancho de banda. La explicación es que, en dicho experimento se mantuvo fija la inyección, por lo que la degradación en la respuesta en frecuencia venía determinada fundamentalmente por efecto de la propagación de la potencia óptica en una determinada longitud de fibra.

## 5.2. Caracterización inyectando con un rabillo corto de fibra SI-POF

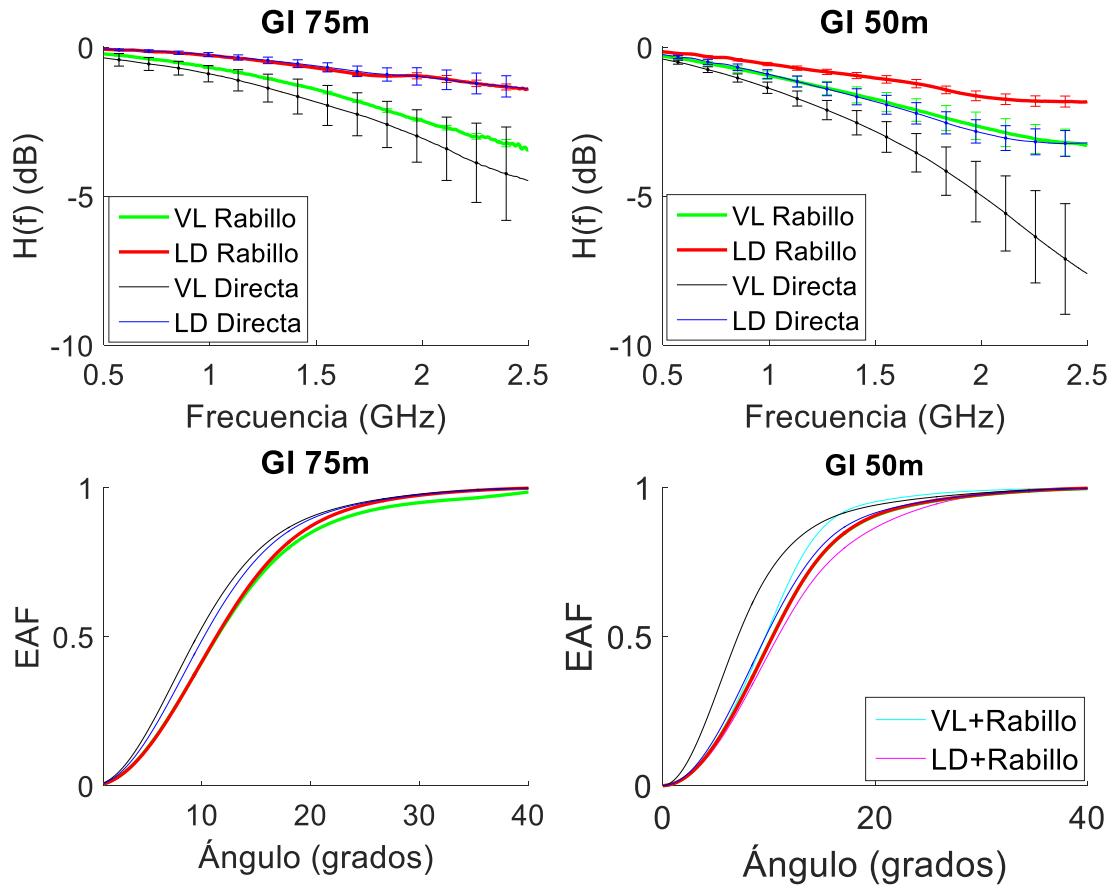
Para comparar el comportamiento en otras condiciones de inyección hemos utilizado un rabillo de fibra de salto de índice (concretamente fibra GH). Un extremo del rabillo se conecta directamente a la fuente en cada caso y el otro extremo a la fibra GI bajo test mediante un conector. De esta forma, se pretende aumentar la apertura de la inyección (la fibra GH tiene una apertura cercana a 0.5) y homogeneizarla, ya que se espera que sea menos variable al realizarla de esta forma y no directamente del láser. Además, la luz a la salida del rabillo tendrá una naturaleza más difusa que la que sale directamente de los láseres, que es muy coherente. En la **Figura 5.4** se presentan las medidas para la fuente VL con la fibra de 75 metros.



**Figura 5.4:**  $S_{21}$  (izquierda) y Respuesta frecuencial (derecha) de GI-POF 75 m con VL y rabillo de GH

Los resultados permiten valorar cómo la inyección a través del rabillo reduce considerablemente la variabilidad y aumenta el ancho de banda que en este caso son 2.28 GHz. Como contrapartida, se recibe menor potencia que en el caso de transmitir directamente con el láser.

En la **Figura 5.5** se representan los resultados para las dos fuentes y las dos longitudes de fibra junto a las medidas sin el rabillo para facilitar su comparación. El código de color utilizado para las distintas condiciones en las respuestas en frecuencia es el mismo que para las EAFs. Las EAFs calculadas a partir de los FFPs obtenidos sólo con el rabillo de 1 metro conectado a cada una de las fuentes enfrentado directamente a la pantalla, se han representado también en la gráfica correspondiente a las medidas para 50 metros (en azul claro para el VL y magenta para el LD7). Estas funciones representan la distribución de intensidad inyectada a la fibra con cada fuente cuando se usa el rabillo. Las EAFs obtenidas conectando la GI-POF a través del rabillo presentan una subida relativamente suave al aumentar el ángulo, lo que se corresponde con una distribución de intensidad más ancha, que es lo que se esperaba.



**Figura 5.5:** Comparación de Respuestas frecuenciales y EAFs

En todos los casos, la inyección con el rabillo reduce considerablemente la variabilidad en las medidas de respuesta en frecuencia. En el caso de la fuente VL, además, mejora considerablemente la respuesta en frecuencia, particularmente para la fibra de 50 metros cuya respuesta con inyección directa es la más baja. Para la fuente LD la respuesta en frecuencia con el rabillo supone cambios menos drásticos.

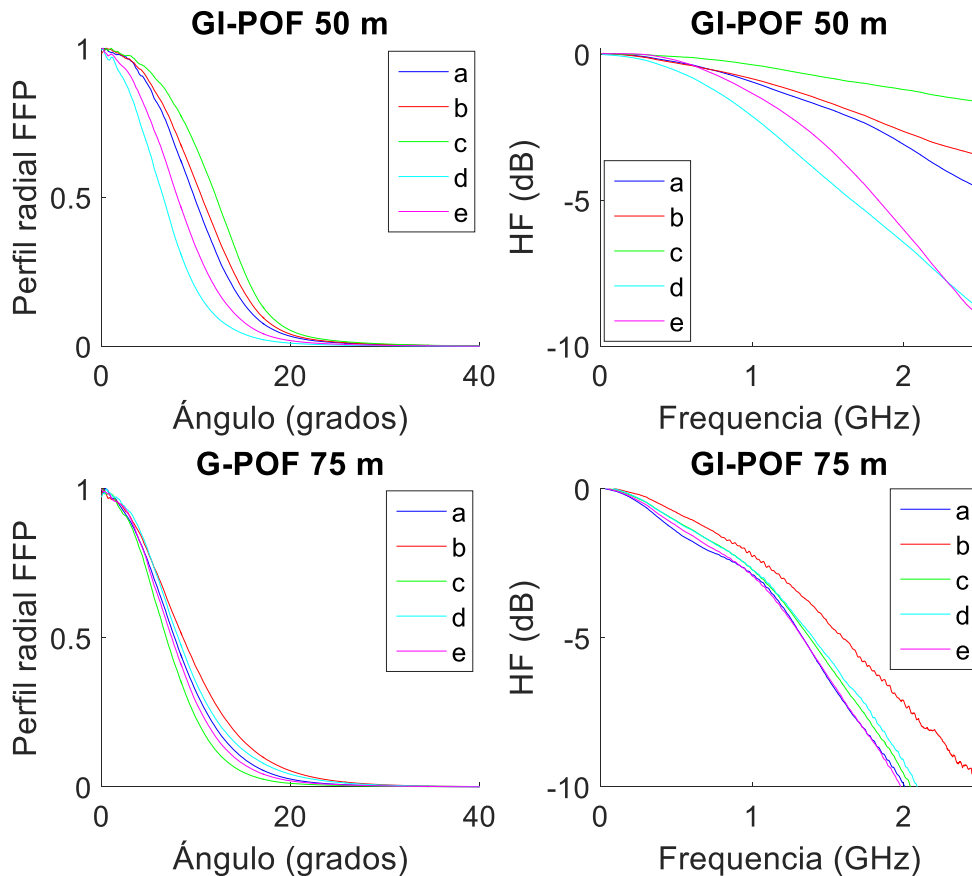
Estudiando la forma de la EAF, se ve que el peor comportamiento en frecuencia está relacionado con una subida más abrupta de la EAF. Esto es un hecho diferencial para la GI-POF ya que normalmente en las SI-POFs suele ocurrir lo contrario. Se resalta el caso de la fibra de 50 metros con el VL e inyección directa, que muestra la peor respuesta en frecuencia y también la distribución más estrecha. Sin embargo, las distribuciones de intensidad de la fibra de 50 metros

obtenidas con el LD7 con y sin rabillo son muy similares, y esto concuerda con la menor diferencia de sus respectivas respuestas en frecuencia.

### 5.3. Medidas simultáneas de respuesta en frecuencia y distribución de intensidad

Para determinar la correlación entre la apertura de la inyección y la respuesta en frecuencia, se ha escogido la fuente VL, que presenta mayor variabilidad y más sensibilidad a los cambios con la inyección.

El procedimiento seguido consiste en medir la distribución de intensidad y la respuesta en frecuencia sin mover la inyección. Cada vez que se cambia la inyección, se toman ambas medidas consecutivamente. En cada cambio se ha cortado la punta de la fibra y en algunas ocasiones se ha pulido, lo que suele determinar una distribución a la salida más estrecha. Los resultados se muestran en la **Figura 5.6** para GI-POFs de 50 y 75 metros.



**Figura 5.6:** Perfil radial y Respuesta frecuencial de GI-POF 50 m (arriba) y 75 m (abajo) con VL

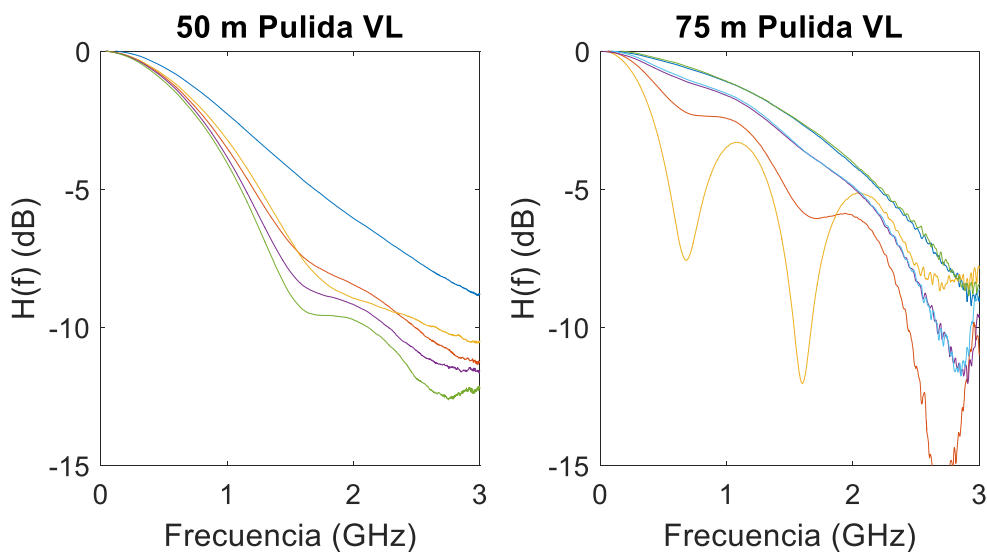
Las gráficas, particularmente las que representan las medidas obtenidas con 50 metros, reflejan que existe esta correlación: la curva en color verde es la más ancha de las distribuciones de intensidad en este caso y también la más alta respuesta en frecuencia, mientras que la de color azul claro es la más estrecha y corresponde a la peor respuesta en frecuencia.

En el caso de 75 metros, la variabilidad de las medidas es menor y es más difícil apreciar esta correlación, pero también se puede ver que la curva roja es la más ancha de las distribuciones de intensidad, y a la vez la más alta de las respuestas frecuenciales.



#### 5.4. Influencia del pulido en los extremos de la fibra

Los resultados anteriores sugieren que cuando la luz entra en la fibra con una mayor directividad (menor apertura angular y menor difusión) la respuesta frecuencial es peor. Por el contrario, cuando se usa el rabillo que ensancha la inyección y difunde la luz, la respuesta frecuencial mejora. Para confirmar este hecho, se han obtenido medidas de la respuesta en frecuencia puliendo al menos la punta que se conecta al láser. La **Figura 5.7** muestra los resultados para los carretes de 50 y 75 metros.

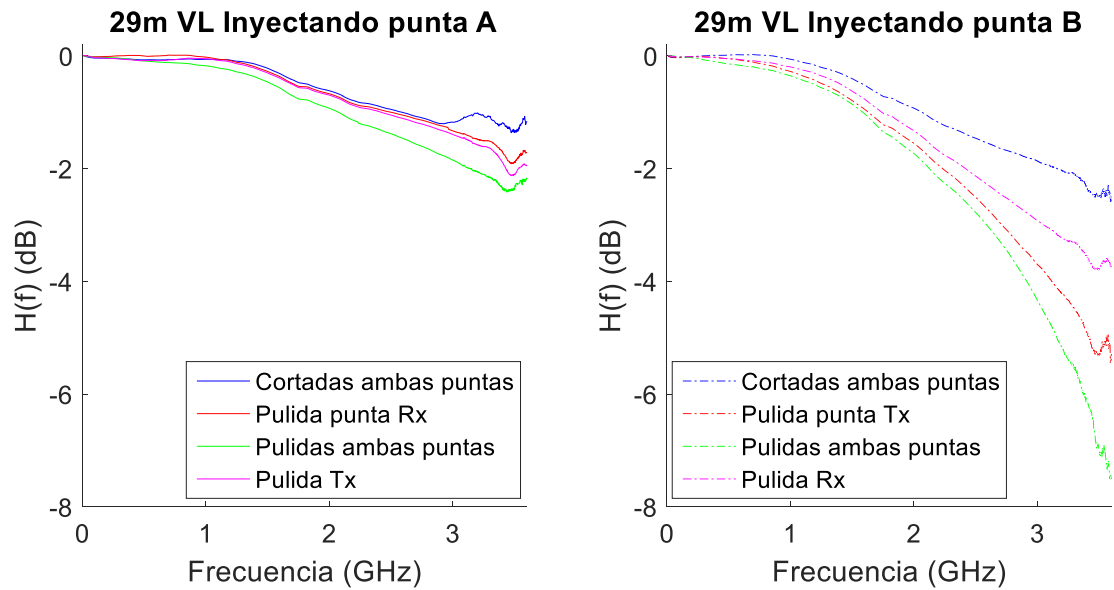


**Figura 5.7:** Respuesta en frecuencia con fibra de 50 m (izquierda) y 75 m (derecha) pulida en uno o dos extremos

Las respuestas muestran algunas curvas con oscilaciones (particularmente notables en una obtenida para 75 metros) que se pueden relacionar con batidos en el receptor que se producen cuando las condiciones son adecuadas. Por ello, este efecto se revela con la fuente VL, que al tener una lente produce una focalización mejor sobre la fibra y más claramente cuando se pule una de las puntas o, mejor aún, ambas. La hipótesis de que se trata de batidos en el receptor viene reforzada por la dependencia de la separación entre oscilaciones respecto de la longitud de fibra (mayor separación para 50 metros que para 75 metros, donde las oscilaciones tienen mayor frecuencia).

Para comprobar que se sigue esta tendencia se han obtenido también las respuestas en frecuencia para 29 metros. En este caso se trabajó con las dos puntas y se obtuvieron respuestas en frecuencia puliendo cada una de ellas o ambas. Los resultados se muestran en la **Figura 5.8**:





**Figura 5.8:** Respuesta frecuencial con fibra de 29 m pulida en los dos extremos

En estas medidas, se ve claramente que el pulido ayuda a la formación de estas interferencias en el detector ya que en los casos en los que la medida se realiza con las dos puntas pulidas, es cuando mejor se visibilizan. Para esta longitud de fibra prácticamente sólo se ve un lóbulo de oscilaciones, lo que es consistente con la hipótesis de que las interferencias tienen relación con la longitud de la fibra. Para explicar estos resultados de forma más precisa sería necesario un estudio específico orientado a desvelar la forma en la que se producen estas interferencias y los factores que contribuyen a su formación lo que puede proponerse como una de las líneas futuras de extensión de este trabajo.

Por otra parte, en este experimento, las mayores diferencias de comportamiento las encontramos entre ambas puntas. Inyectando por la punta A, aunque el efecto del pulido es el mismo que cuando se inyecta por la B, las diferencias que introduce entre las 4 condiciones son mucho menores que en el caso de la punta B. Una posible explicación es la existencia de alguna microcurvatura cercana a la punta A que difunda la luz reduciendo las interferencias.

## 5.5. Conclusiones

En este capítulo se han determinado las condiciones que favorecen la optimización del ancho de banda de la fibra GI-POF: i) el uso de fuentes de menor coherencia y que no sean focalizadas sobre la fibra y ii) trabajar con superficies más rugosas evitando el pulido de las terminaciones de las fibras. Ambas condiciones tienden a que la potencia óptica recibida sea menor, por lo que un estudio más completo ayudaría a establecer unas condiciones intermedias de compromiso que permitan explotar mejor el potencial de este tipo de fibras.

## Capítulo 6 : Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se resumen las conclusiones obtenidas en la realización de los objetivos planteados al inicio de este trabajo que se han desarrollado en los capítulos anteriores, y se proponen varias líneas de continuación que han abierto algunos de los resultados obtenidos.

### 6.1. Conclusiones

La finalidad de este proyecto ha sido realizar una caracterización completa de las propiedades de transmisión de la fibra de PMMA de 1 mm de núcleo y perfil de gradiente de índice, analizando el impacto de las condiciones de inyección en dichas propiedades.

Para desarrollar el objetivo principal, se han caracterizado previamente los dispositivos optoelectrónicos disponibles para determinar sus rangos de aplicación y seleccionar los más apropiados para la GI-POF. Así, se ha determinado con precisión la potencia de saturación y factor de conversión del foto-detector SPD-2, de gran ancho de banda y alta sensibilidad, y se ha definido un protocolo muy completo de caracterización de fuentes ópticas que consiste en realizar medidas del parámetro S21 en distintas condiciones, de la distorsión variando la frecuencia y la potencia de modulación, y de la distribución angular de intensidad. En este trabajo este protocolo se ha aplicado a las fuentes LD7 y VL, y ha permitido seleccionar el modo de operación más ventajoso para cada uno de los experimentos realizados. Además, este protocolo será de utilidad en el futuro a la hora de caracterizar el rango de aplicación de una nueva fuente óptica.

Una vez seleccionado el LD7 como fuente que ofrece un mejor compromiso entre potencia de emisión y respuesta frecuencial, se ha diseñado un experimento basado en el método de corte partiendo de una GI-POF de 115 metros y cortando tramos de distinta longitud hasta llegar a 1 metro. Para cada longitud analizada se han obtenido experimentalmente: la potencia recibida, la respuesta en frecuencia, la distribución angular de intensidad, y el BER en función de la tasa de transmisión. Se ha tenido especial cuidado en mantener fija la inyección para que sobre la variación de las propiedades medidas sólo influya la longitud de fibra.

A partir de estas medidas se han obtenido distintos parámetros de transmisión:

- Atenuación de 0.23 dB/m, mayor que la SI-POF, pero dentro de lo esperado para este tipo de fibra.
- Anchos de banda mayores de 2 GHz incluso para 115 metros, con una respuesta en frecuencia prácticamente plana por debajo de 20 metros.
- Transmisión NRZ con BER de  $10^{-6}$  a tasas de 1 Gb/s hasta longitudes de 75 metros.

Comparando las medidas con otras obtenidas para SI-POF estándar se ha observado que:

- La degradación de la respuesta en frecuencia conforme aumenta la longitud es mucho más lenta en la GI-POF que en las fibras de salto de índice.
- La anchura de la distribución angular de intensidad a la salida de la fibra es independiente de su longitud, a diferencia de lo que ocurre en las SI-POFs.

- El efecto predominante en la degradación de la transmisión con GI-POF al aumentar la longitud es la atenuación más que la dispersión como suele ocurrir con las SI-POFs.

Finalmente, se ha estudiado la influencia de las condiciones de inyección, obteniendo experimentalmente respuestas en frecuencia y distribuciones de intensidad bajo distintas condiciones de inyección dadas tanto por el tipo de fuente o su focalización como por la preparación de los extremos de la fibra. Los resultados han mostrado que cuando la luz entra en la fibra con una mayor directividad y más focalizada la respuesta frecuencial se degrada, y esta degradación se incrementa si los extremos de la fibra están bien pulidos.

## 6.2. Líneas futuras

El análisis de las propiedades de transmisión de la GI-POF sirve como punto de partida de distintas líneas de investigación del grupo de POF. Por un lado, las conclusiones de este trabajo servirán para proponer un modelo matricial de GI-POF similar al que ya se ha diseñado para la SI-POF, utilizando los resultados experimentales obtenidos para ajustar los parámetros característicos de dicho modelo. Además, el conocimiento preciso de estas propiedades permitirá seleccionar los elementos activos que den lugar a una configuración óptima para cada longitud de enlace para ensayar novedosas técnicas de modulación que permitan aumentar la eficiencia espectral frente a la modulación de intensidad.

Por otra parte, el estudio de la influencia de las condiciones de inyección está todavía abierto ya que, aunque se ha determinado que las condiciones que favorecen la optimización del ancho de banda de la fibra GI-POF son, por un lado, el uso de fuentes de menor coherencia y que no sean focalizadas sobre la fibra y, por otro lado, trabajar con superficies más rugosas evitando el pulido de las terminaciones de las fibras, estas dos condiciones tienden a que la potencia óptica recibida sea menor, por lo que un estudio más completo ayudaría a establecer unas condiciones intermedias de compromiso que permitan explotar mejor el potencial de este tipo de fibras, lo que puede proponerse como otra de las líneas futuras de extensión de este trabajo. Adicionalmente, sería necesario un estudio específico orientado a conocer de forma precisa por qué y cómo se producen las interferencias que se han observado y los factores que contribuyen a su aparición, en principio, de cara a evitarlos.

Además, quedan todavía aspectos de la caracterización de este tipo de fibra que son importantes tanto para su aplicación en algunos entornos (redes dentro de automóviles o de aeronaves), como para la obtención de un modelo completo de las GI-POF de PMMA. Algunos de estos aspectos son las pérdidas por curvatura o por presión, el impacto de estas perturbaciones sobre la respuesta en frecuencia, y la influencia de cambios bruscos de temperatura o cuando la fibra se mantiene a una temperatura próxima al límite durante un tiempo prolongado.

## Referencias

- [1] O. Ziemann, J. Krauser, P. Zamzow y W. Daum, Application of Polymer Optical and Glass Fibers. In *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*, Springer, 2nd edition, 2008.
- [2] A. Grzemba, MOST: the automotive multimedia network, Francis Verlag; ISBN 9783645650618, 2011.
- [3] M. Losada y J. Mateo, «WDM Systems and Networks: Modelling, Simulation, Design and Engineering,» de *Short Range (In-Building) Systems and Networks: A Chance for Plastic Optical Fibers*, Series: Optical Networks (B. Mukherjee), N. Antoniadis, G. Ellinas, I. Roudas; Springer (ISBN: 9781461410928), 2012, pp. 301-323.
- [4] D. Richards, M. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang y N. Madamopoulos, «Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System,» *J. Light. Technol.*, vol. 31, pp. 468-475, 2013.
- [5] S. Loquai, R. Kruglov, B. Schmauss, C.-A. Bunge, F. Winkler, O. Ziemann, E. Hartl y T. Kupfer, «Comparison of Modulation Schemes for 10.7 Gb/s Transmission Over Large-Core 1 mm PMMA Polymer Optical Fiber,» *J. Light. Technol.*, vol. 31, pp. 2170-2176, 2013.
- [6] K. Koike y Y. Koike, «Design of Low-Loss Graded-Index Plastic Optical Fiber Based on Partially Fluorinated Methacrylate Polymer,» *J. Light. Technol.*, vol. 27, n° 1, pp. 41-46, 2009.
- [7] F. Forni, Y. Shi, H. van den Boom, E. Tangdiongga y A. Koonen, «WLAN and Multiband LTE-A Simultaneous Transmission over 50m thick-core GI-POF for IN-home Distributed Antenna Systems,» de *Proceedings of the 2017 26th Int. Conf. Plastic Opt. Fibers*, Aveiro, Portugal, 2017.
- [8] M. Losada, J. Mateo y A. Lopez, «Matrix model of optical power propagation in Plastic Optical Fibres,» de *Proceedings of the 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Munich (Alemania), 2010.
- [9] A. Lopez, M. Losada y J. Mateo, «Simulation framework for POF-based communication systems,» de *Proceedings of the 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, IEEE, 2015.
- [10] E. Laporta Puyal, Caracterización experimental de las propiedades de transmisión en fibras ópticas de plástico de índice gradual (GI-POF), Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, 2016.
- [11] A. Lopez, A. Losada, J. Mateo y J. Zubia, «On the Variability of Launching and Detection in POF Transmission Systems,» de *Proceedings of the 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, IEEE, 2018.
- [12] S. W. Park, «Production, properties and future of PMMA-GI-POF,» de *Meeting of the ITG-SC 5.4.1*, Oldenburg, 12.05.2006.

- [13] J. Arrue y J. Zubia, «Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications,» *Optical Fiber Technology*, vol. 7, pp. 101-140, 2001.
- [14] A. López, M. A. Losada y J. Mateo., «Last Mile Systems, In-House-Networks, LAN and MAN Applications: Polymer Optical Fibers, POF,» de *Optical and Microwave Technologies for Telecommunication Networks*, O. Strobel, John Wiley & Sons (ISBN: 9781119971900), 2016, pp. 306-328.
- [15] J. Mateo, M. Losada y Z. I. Garcés, «Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers,» *Opt. Express*, vol. 14, pp. 9028-9035, 2006.
- [16] S. Ramón, Medida de la respuesta frecuencial en fibras ópticas de plástico de múltiples núcleos mediante un analizador de redes vectorial, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, 2015.
- [17] M. Osta Lombardo, Análisis de los efectos de un scrambler sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico de salto de índice mediante el modelo matricial de propagación, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Proyecto Fin de Carrera, Mayo 2010.
- [18] D. Espinosa Navarro, Desarrollo de un sistema automático de captación y análisis de imágenes de la distribución de campo lejano de fibras ópticas, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Proyecto Fin de Carrera, Diciembre 2004.
- [19] M. Kagami, A. Kawasaki, M. Yonemura, M. Nakai, P. V. Mena y a. D. R. Selviah, «Encircled Angular Flux Representation of the Modal Power Distribution and Its Behavior in a Step Index Multimode Fiber,» *J. of Light. Technol.*, vol. 34, nº 3, February 1, 2016.
- [20] P. Heredia Gil, Estudio de la capacidad de transmisión de las fibras ópticas de plástico de gran núcleo en aplicaciones en el hogar, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Proyecto Fin de Carrera, Julio 2008.
- [21] Japanese Standards Association, «JIS C6824 Test Methods for Bandwidth of All Plastic Multimode Optical Fibres,» Tokyo, Japan, 1992.
- [22] Japanese Standards Association, «JIS C6861 Test Methods for Attenuation of All Plastic Multimode Optical Fibres,» Tokyo, Japan, 1992.
- [23] A. López, M. A. Losada, X. J. J. Mateo, D. H. Richards y a. N. Antoniadis, «Transmission Performance of Plastic Optical Fibers Designed for Avionics Platforms,» *J. of Light. Technol. Special Issue on: Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics*, vol. 36, nº 21, pp. 5082-5088, 2018.
- [24] «Fiber Cutter,» [En línea]. Available: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=110&cat=cutting>. [Último acceso: (Accessed: 5 November 2013)].
- [25] «POF Cutter Block,» [En línea]. Available: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=105>. [Último acceso: (Accessed: 1 October 2013)].
- [26] «Disposable Fiber Cutter,» [En línea]. Available: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=120&>. [Último acceso: (Accessed: 15 October 2013)].

- [27] «Micro-Strip TM Stripping Tool,» [En línea]. Available: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=330>. [Último acceso: (Accessed: 5 October 2013)].
- [28] «Slurry, Polishing,» [En línea]. Available: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=450&cat>. [Último acceso: (Accessed: 25 October 2013)].
- [29] M. Chueca Lázaro, Desarrollo de un sistema experimental para medidas de campo cercano en fibras ópticas de plástico multinúcleo, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, 2015.

## Anexo I. Preparación de los extremos de POF

El primer paso que se realiza cuando se trabaja con POF es el corte, posteriormente el pelado, y por último el pulido, el cual permite disminuir las irregularidades de la superficie.

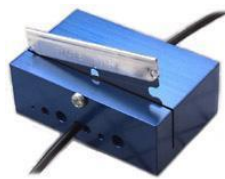
Las cortadoras de POF de las que se dispone en el laboratorio son:

- Cortadora metálica [24]. Permite realizar un corte perpendicular sin necesidad de una superficie plana para el corte, y trabajar tanto con fibras simples como con fibras dobles de 1.5 y 2 mm de diámetro de recubrimiento. Según el fabricante, presenta una vida útil de alrededor de 5000 cortes.



**Figura I.1:** Cortadora metálica de 1.5 y 2 mm

- Cortadora metálica profesional [25]. Permite trabajar con diferentes tamaños de fibras (entre 0.75 y 1 mm de diámetro), incluyendo fibra pelada. Requiere superficie plana de apoyo. Según el fabricante, el número máximo de cortes es de 50.



**Figura I.2:** Cortadora metálica de 0.75 y 1 mm

- Cortadora desechable de plástico [26]. Permite trabajar con fibras simples entre 0.75 y 1 mm de diámetro de fibra pelada y fibras con 2.2 mm de diámetro con recubrimiento. Necesita una superficie plana de apoyo. El fabricante recomienda un solo corte.



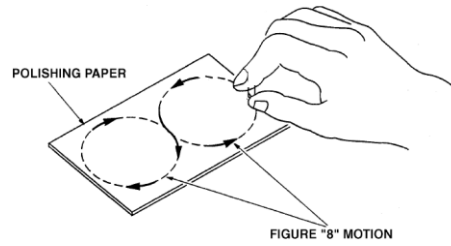
**Figura I.3:** Cortadora de plástico de 0.75 y 1 mm

Por otro lado, para retirar el recubrimiento del extremo de la fibra se utiliza la *Micro-Strip<sup>TM</sup> precision stripper* [27].



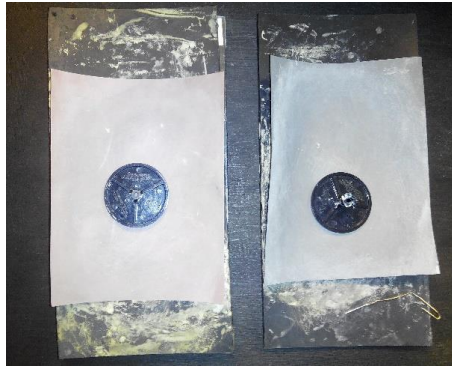
**Figura I.4:** Peladora Micro-Strip

Por último, la metodología para pulir el extremo de la fibra consiste en realizar unos 30 giros en forma de 8 sujetando la fibra perpendicularmente con un disco de soporte, como se indica en la **Figura I.5**.



**Figura I.5:** Movimiento de 8 en el proceso de pulido

Se puede realizar sobre un folio, o sobre una base de vidrio donde se apoyan dos lijas impregnadas en líquido de pulido (*polishing slurry*) [28]. Primero se utiliza la de grano grueso (*2000-grit polishing paper*), y después la de grano fino (*3  $\mu$ m polishing paper*).



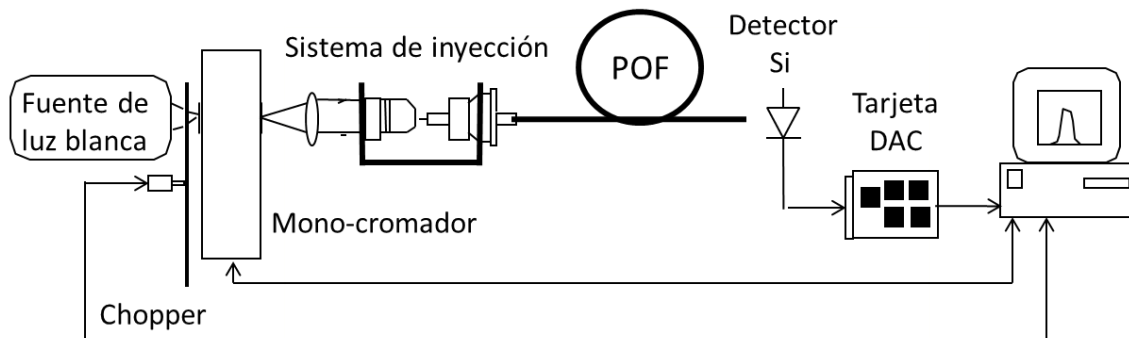
**Figura I.6:** Discos de soporte y papel de lija de grano fino (izquierda) y de grano grueso (derecha) [29]



## Anexo II. Medida de la atenuación espectral

### II.1 Sistema experimental

Para realizar esta medida se ha utilizado el sistema experimental diseñado siguiendo el estándar JIS [22] y que se utiliza en la asignatura de Laboratorio de Comunicaciones Ópticas para la caracterización de la atenuación espectral de fibras de vidrio. Para adaptar el sistema ha sido necesario cambiar los posicionadores de fibra y el detector (de InGaAs para la fibra de vidrio con mayor sensibilidad en el rango de infrarrojo: 1000-1600 nm) por un detector de Silicio (con mayor sensibilidad en el visible) y área ancha, más adaptado a la POF.



**Figura II.1:** Esquema del sistema de medida de atenuación espectral

La fuente es de luz blanca y su imagen se forma sobre la rendija de entrada del monocromador, el cual actúa de filtro que selecciona la longitud de onda de trabajo; mediante un motor paso a paso que posee el propio monocromador y que puede controlarse desde el ordenador.

A la salida del monocromador se colima el haz de luz tal que su posterior inyección en la fibra sea óptima. La luz, que previamente ha sido modulada por un chopper, se inyecta en la fibra mediante un sistema con un objetivo de microscopio y 3 posicionadores (XYZ). El extremo de salida de la fibra se enfrenta directamente (sin ayuda de lentes) a un detector de área grande ( $1 \text{ mm}^2$ ), asegurando que la fibra está centrada con el detector, y que se encuentra a una distancia no mayor de 1 mm, lo que asegura que toda la luz que sale de la fibra es captada por el detector.

La salida del preamplificador del detector se conecta a la tarjeta de adquisición que realiza una recepción síncrona de la señal a través de un conector específico. Para ello tendremos que conectar el controlador del chopper a la entrada de señal de modulación de la tarjeta para que sepa cuál es la señal de referencia a la que estamos modulando la luz. El valor de la medida de potencia óptica deberá ser volcado en el ordenador a través de la citada tarjeta de adquisición.

### II.2 Protocolo de medida

Para obtener la curva de atenuación espectral por el método de corte es necesario obtener dos medidas (dos curvas de potencia en función de la longitud de onda) mediante los siguientes pasos:

1. Medida de un barrido en función de la longitud de onda de la potencia a la salida de la fibra de longitud  $L$ :  $P_L(\lambda)$

2. Se corta la fibra dejando 1 metro sin mover el extremo de inyección, es decir, el que está situado en el posicionador y enfrentado a la salida del monocromador.
3. Medida de un barrido en función de la longitud de onda de la potencia a la salida de la fibra de longitud 1m:  $P_1(l)$

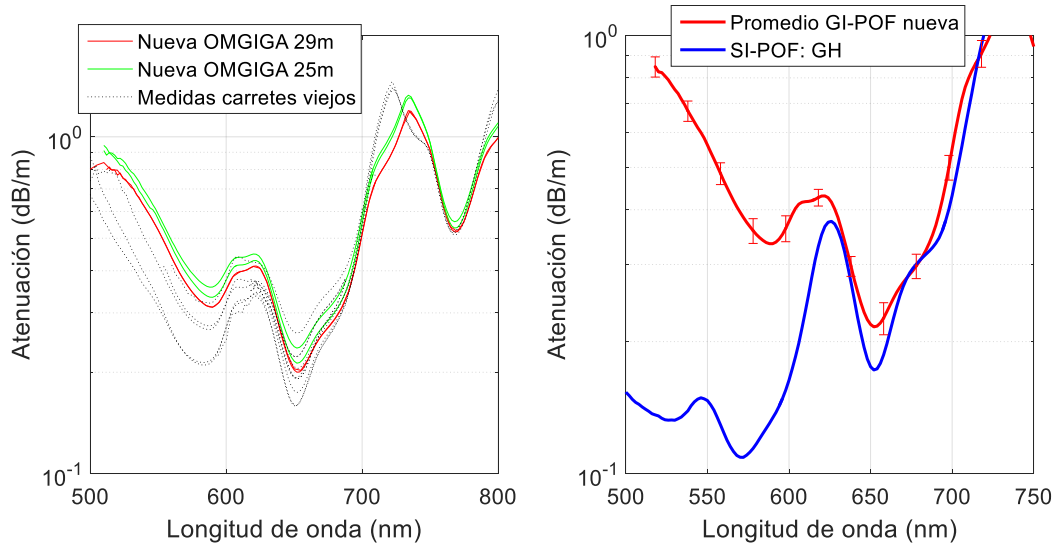
De esta forma, la atenuación será:

$$\alpha(l) = \frac{10}{L} * \log_{10} \left( \frac{P_L(l)}{P_1(l)} \right) \quad \text{[Ecuación II.1]}$$

Estas dos medidas no son independientes: la realizada con la fibra corta es la referencia y debe estar en las mismas condiciones experimentales que la medida realizada con la fibra más larga. La medida es particularmente sensible a las condiciones de inyección de luz, aunque también es conveniente intentar reproducir la posición relativa de la punta que va al detector.

### II.3 Comparación con otras fibras

Las medidas han sido realizadas para dos tramos del carrete que se ha utilizado en el experimento de caracterización y se han comparado con medidas anteriores, realizadas con segmentos de otros carretes de OMGIGA y con una fibra de salto de índice (la GH):



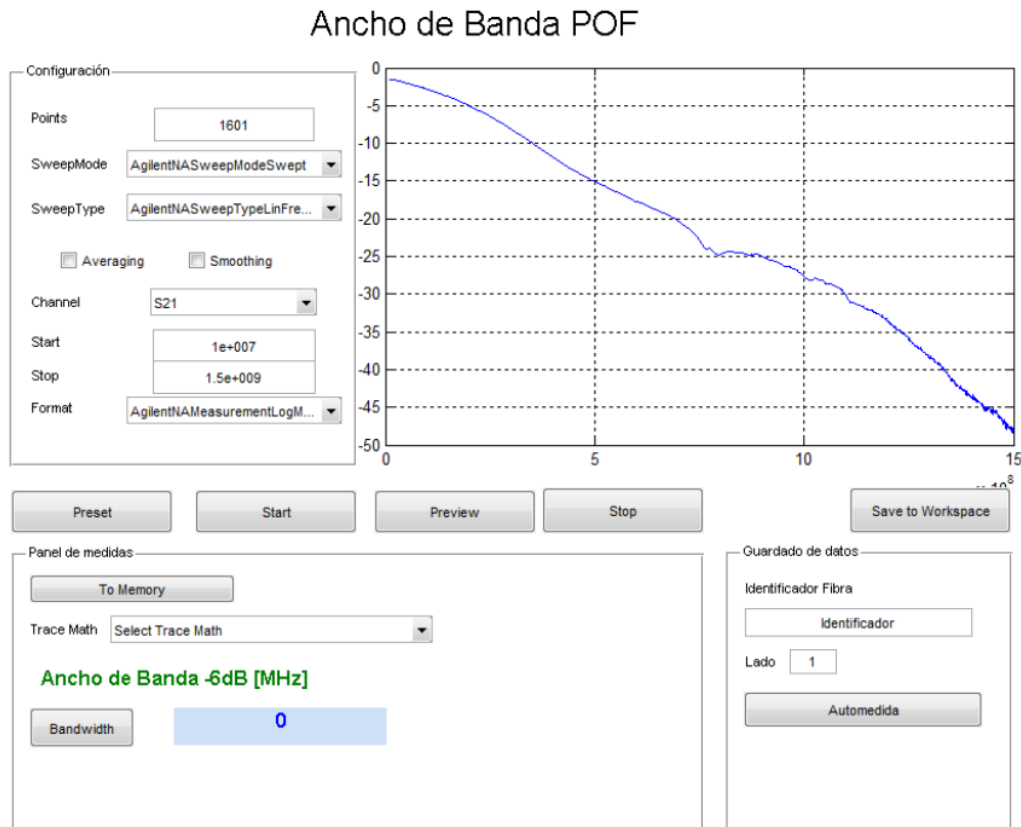
**Figura II.2:** Comparación atenuación distintos carretes

La comparación de las curvas de atenuación espectral obtenidas con el nuevo carrete de OMGIGA muestran la variabilidad habitual que es compatible con las medidas obtenidas anteriormente de [10]. La forma de las curvas y la posición de los mínimos relativos es igual para todos los segmentos de fibra testeados. La comparación con la fibra GH es así mismo consistente con las medidas mostradas en el Capítulo 2, obtenidas de [1]. Esta comprobación será de utilidad a la hora de seleccionar las fuentes más adecuadas para los experimentos de caracterización, de forma que su longitud de onda de emisión corresponda con las regiones con menor atenuación.

## Anexo III. Software utilizado

### III.1 Respuestas frecuenciales

Para medir la respuesta en frecuencia se utiliza un programa llamado *pof.m* diseñado en Matlab en un Trabajo de Fin de Grado anterior [10]. Este programa no solo permite capturar la información del VNA, sino que también permite almacenarla en un fichero con formato de Matlab para su posterior procesamiento. Además, siempre que es posible, muestra el ancho de banda a 6 dB.



**Figura III.1:** Interfaz gráfico del programa de medida de las respuestas frecuenciales

Siguiendo el orden de parámetros que se pueden ver en la **Figura III.1**, el primer parámetro a seleccionar es el número de puntos que se toman, el cual es, por defecto, el máximo posible: 1601.

En segundo lugar, es posible seleccionar las opciones de realizar un promediado y suavizado a la respuesta obtenida. En las medidas realizadas se seleccionan ambas opciones. Manualmente, en el VNA se han fijado el número de medidas promediadas a 48. También manualmente se fija el valor del filtro del ancho de banda IF de barrido a 1 KHz.

Por último, se fijan las frecuencias de inicio y fin del barrido a 10 MHz y 4.5 GHz respectivamente. Estos valores son el mínimo y máximo que permite el VNA. Dado que en este proyecto se trabaja con emisores y receptores de mayor ancho de banda que en el pasado, se han obtenido las medidas bastante por encima del valor por defecto, 1.5 GHz.

El valor de la potencia de RF depende del experimento a realizar. En la caracterización de las fuentes se han utilizado distintos valores. Para las series de medidas por el método de corte se ha fijado en -10 dBm.

En la siguiente tabla se recogen todos estos parámetros:

Parámetro	Valor
Número de puntos	1601
Frecuencia start	10 MHz
Frecuencia stop	4.5 GHz
Potencia RF	-10 dBm
Ancho de banda filtro IF	1 KHz
Promediado (AV)	48

**Tabla III.1:** Parámetros de configuración óptimos de medida de respuesta frecuencial

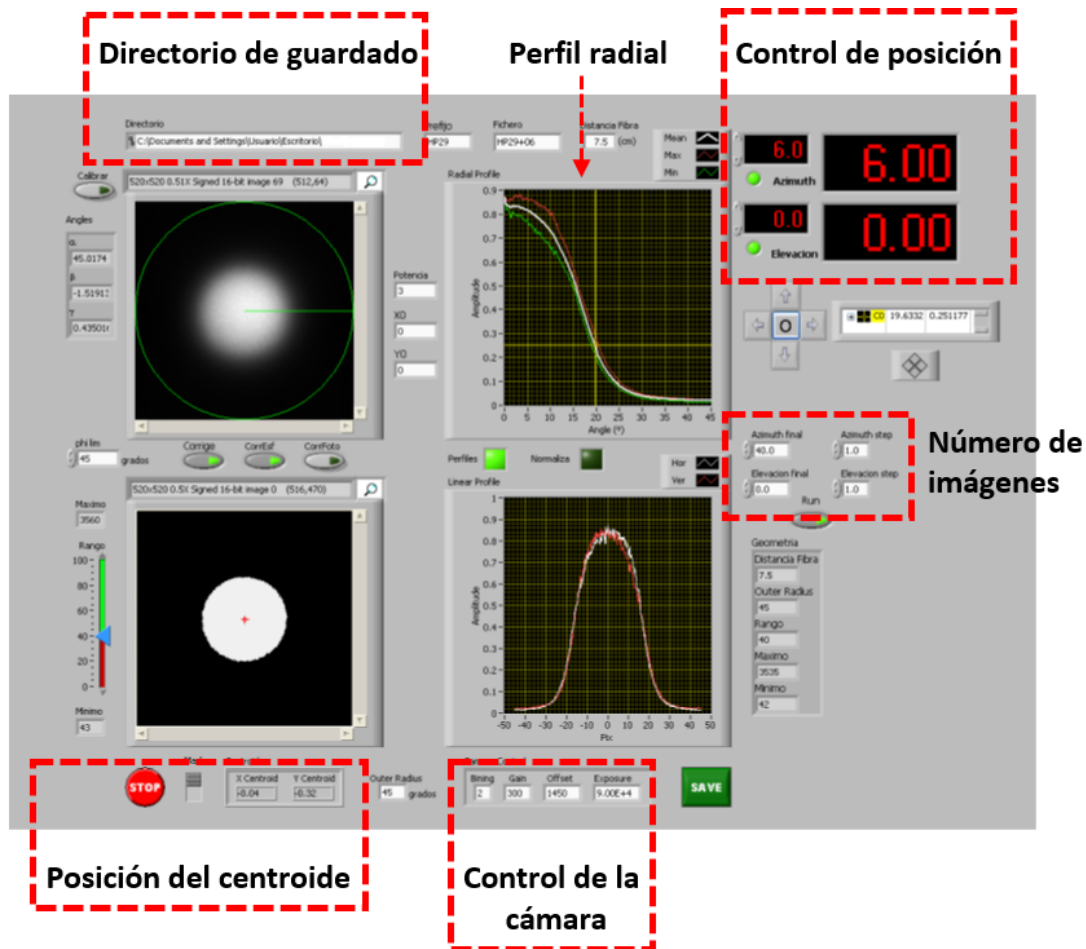
### III.2 Campo lejano

El programa utilizado para medir el campo lejano está desarrollado en LabVIEW, y su interfaz gráfica y funcionamiento se explica a partir de la **Figura III.2**.

La interfaz del programa muestra, en la parte superior izquierda, la imagen captada por la cámara CCD para un ángulo de 0°, la misma imagen umbralizada en la parte inferior izquierda, el perfil radial máximo, promedio y mínimo (rojo, blanco y verde respectivamente) en la parte superior derecha, y el mismo simetrizado en la parte inferior derecha.

Además, permite seleccionar el número de imágenes que se desean captar, modificar el directorio de guardado, y controlar parámetros tales como la posición del centroide, la posición del ángulo, y los parámetros para el control de la cámara. El centroide es un parámetro importante para realizar el alineamiento de la fibra respecto al eje perpendicular a la pantalla. En cuanto a los parámetros de control, el más importante es el tiempo de exposición que han que modificar para cada serie de imágenes para aprovechar el rango dinámico de la CCD, evitando su saturación.

En la parte superior, se introduce el nombre correspondiente a una serie de medidas: SERIE. El programa nombrará los ficheros correspondientes a la serie como SERIE+00, SERIE-01, SERIE+01.... etc. Para cada imagen, se generan 3 ficheros: un fichero .tiff con la imagen propiamente dicha, un fichero .dat con el valor del perfil radial para cada ángulo, y por último un fichero .cgf con los datos de la imagen que aparecen en pantalla, entre otros la posición del centroide y el tiempo de exposición.



**Figura III.2:** Interfaz del programa de medida del campo lejano

### III.3 BER

Para medir el BER se utiliza un programa desarrollado en LabView, con el cual se pueden realizar tanto medidas puntuales como barridos en función de la tasa de bit. Para estos barridos es posible fijar la tasa inicial, la tasa final, y el paso. Además, el programa permite elegir entre dos PRBS diferentes o una secuencia NRZ.

Como se puede ver en la **Figura III.3**, en la parte superior de la interfaz se puede seleccionar el patrón de datos que se desea transmitir (izquierda), y modificar la tasa de transmisión (derecha). En la parte inferior de la interfaz se muestran los resultados de BER, tanto numéricamente (izquierda) como gráficamente (derecha).

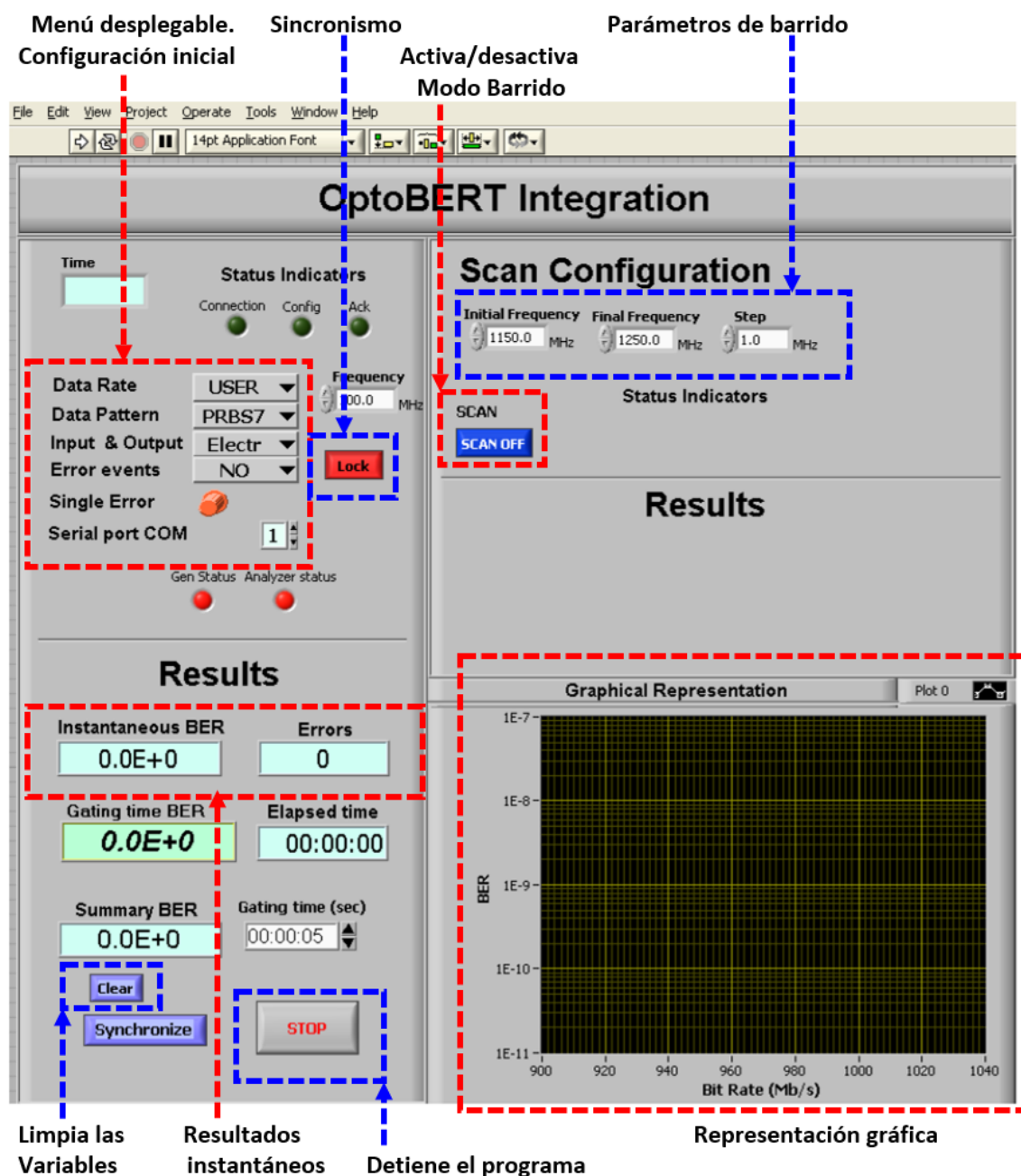


Figura III.3: Interfaz del programa de medida de BER [20]

## Anexo IV. Distorsión de las sinusoides

En este anexo se muestran todas las figuras obtenidas de las medidas realizadas para caracterizar la distorsión armónica del sistema con cada una de las tres fuentes (LD7, LD40 y VL) y distintas corrientes de polarización, tanto en el dominio temporal como en el frecuencial.

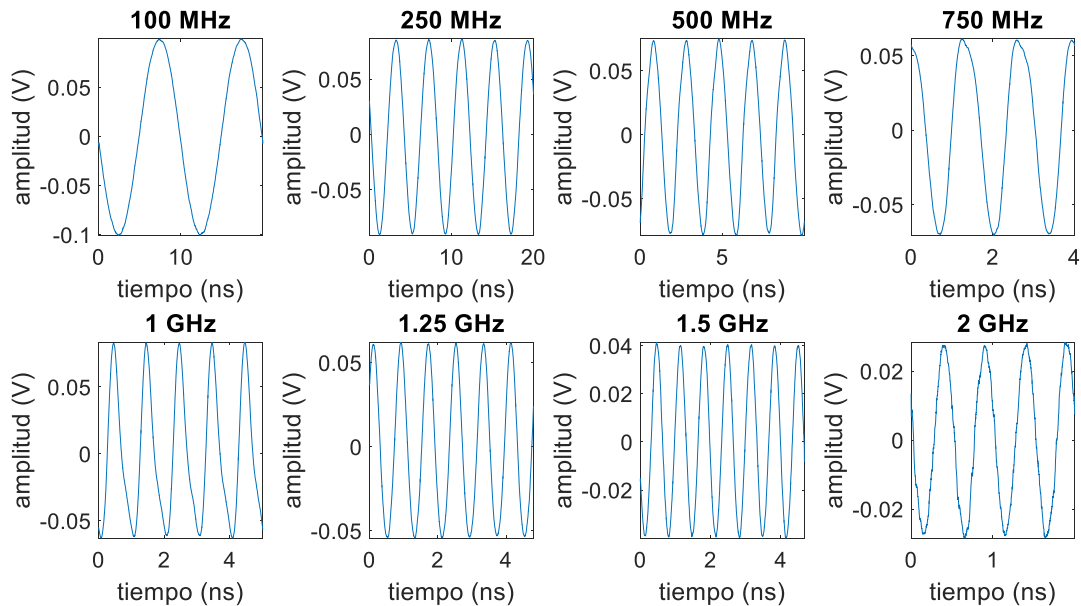
Como ya se ha mencionado previamente, en primer lugar, se realiza un barrido en frecuencia para dos potencias de RF. En segundo lugar, se fija la frecuencia y se aplican diferentes potencias de RF. Los valores de frecuencias y potencias a fijar o variar, dependen en cada caso de la fuente.

### IV.1 LD7

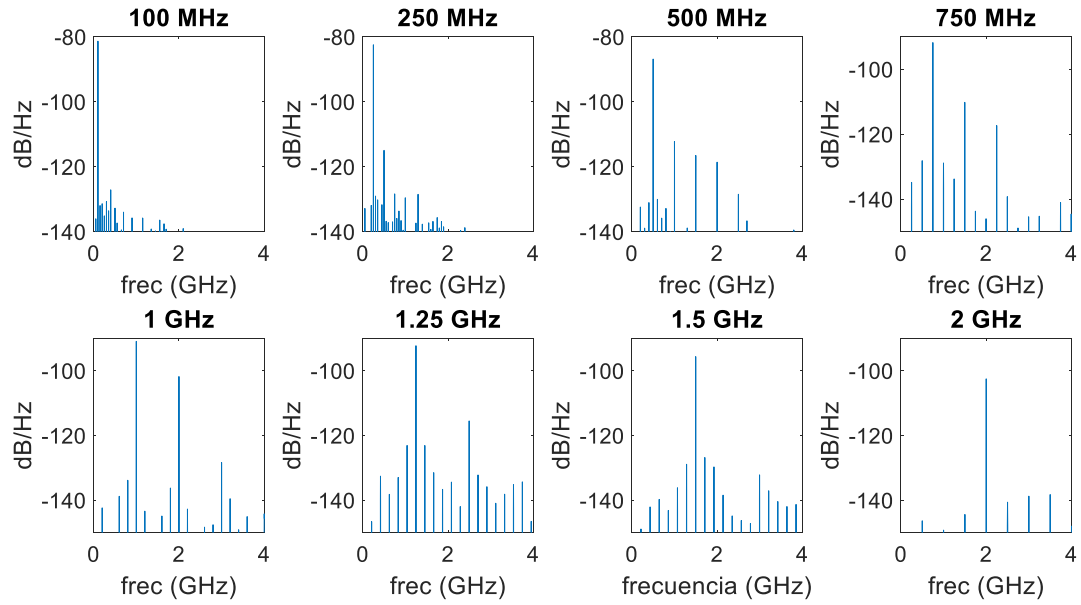
Para caracterizar el LD7, se va a trabajar con tres corrientes de polarización diferentes. En primer lugar, 25 mA, y seguidamente 30 y 40 mA. Por un lado, se hace variar la frecuencia entre 100 MHz y 2 GHz, y las potencias de RF que se fijan son de -3 y +3 dBm. Por otro lado, se fija la frecuencia a 100 MHz, 1 GHz y 2 GHz, y la potencia de RF toma los siguientes valores: -3, 0, 1, 2 y 3 dBm.

#### (a) Intensidad de polarización: 25 mA

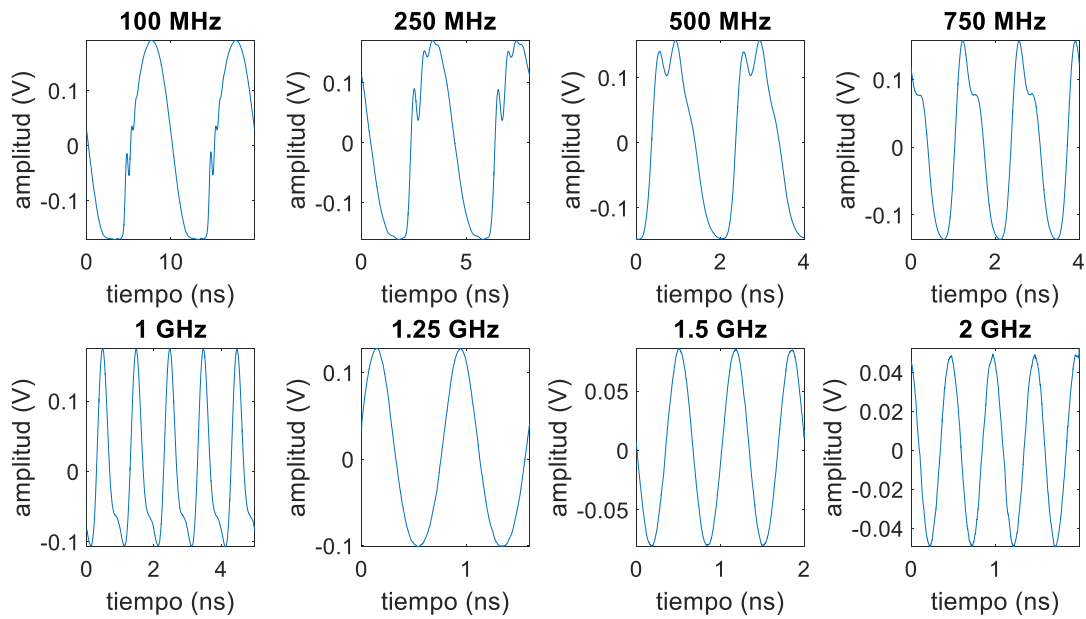
##### (i) Variación de frecuencia



**Figura IV.1:** Potencia RF -3 dBm. Dominio temporal

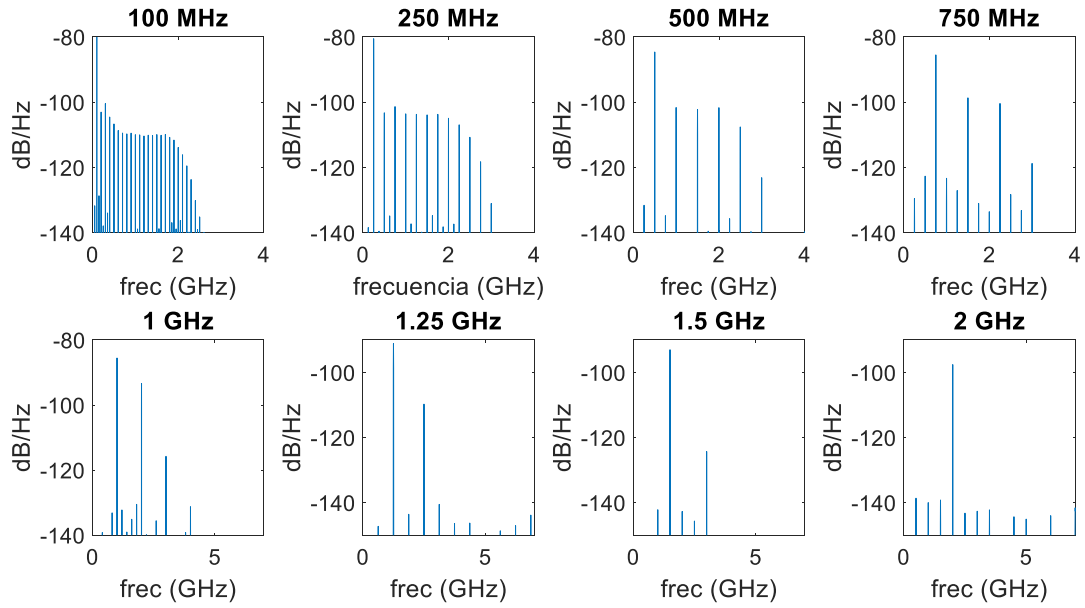


**Figura IV.2:** Potencia RF -3 dBm. Dominio frecuencial



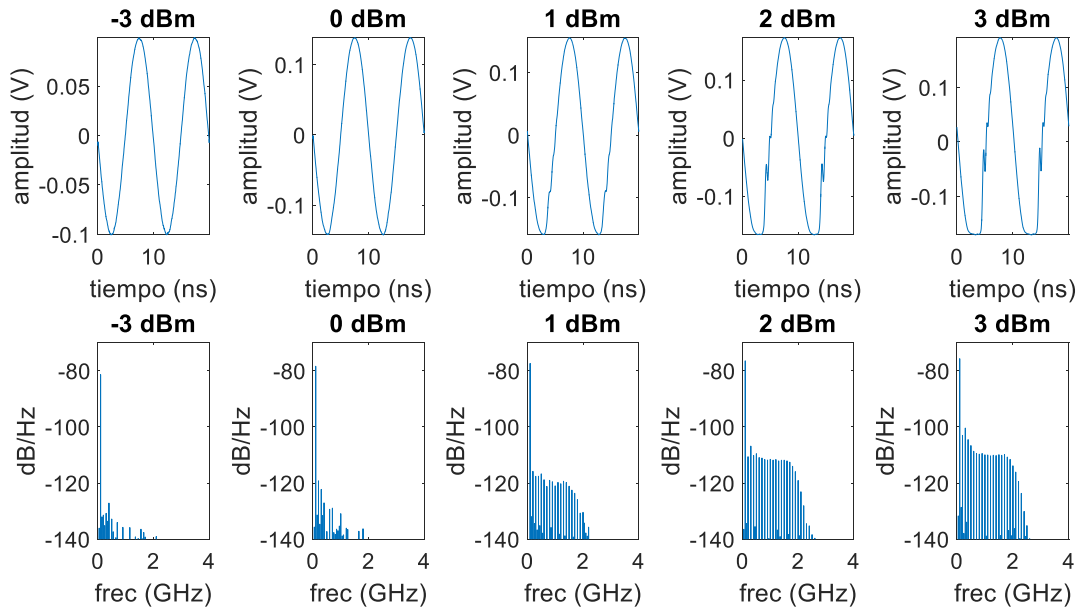
**Figura IV.3:** Potencia de RF +3 dBm. Dominio temporal



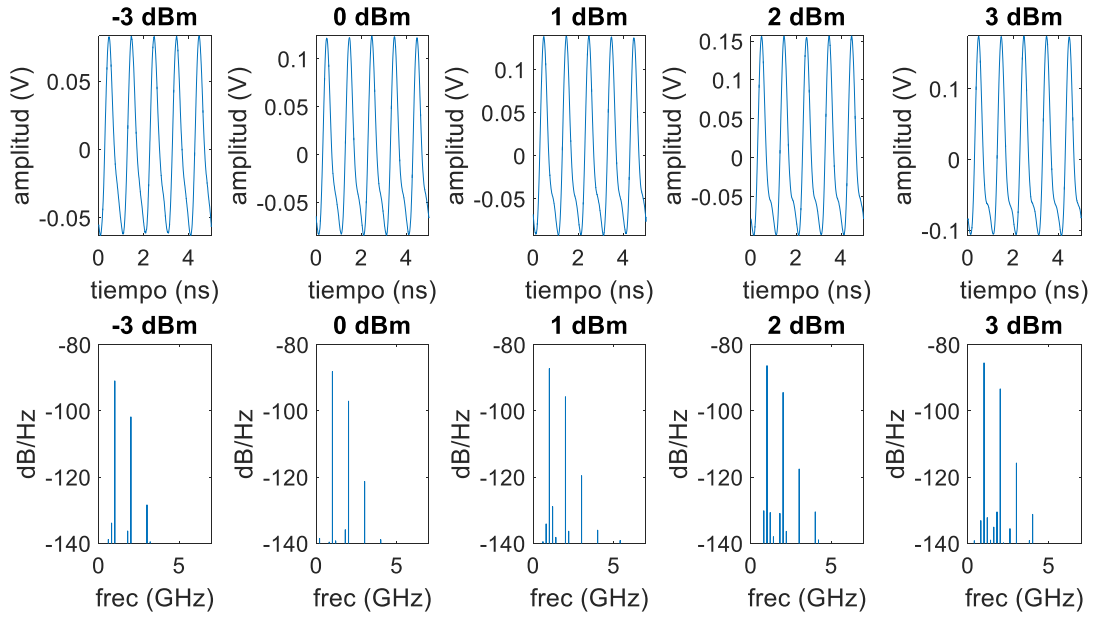


**Figura IV.4:** Potencia de RF +3 dBm. Dominio frecuencial

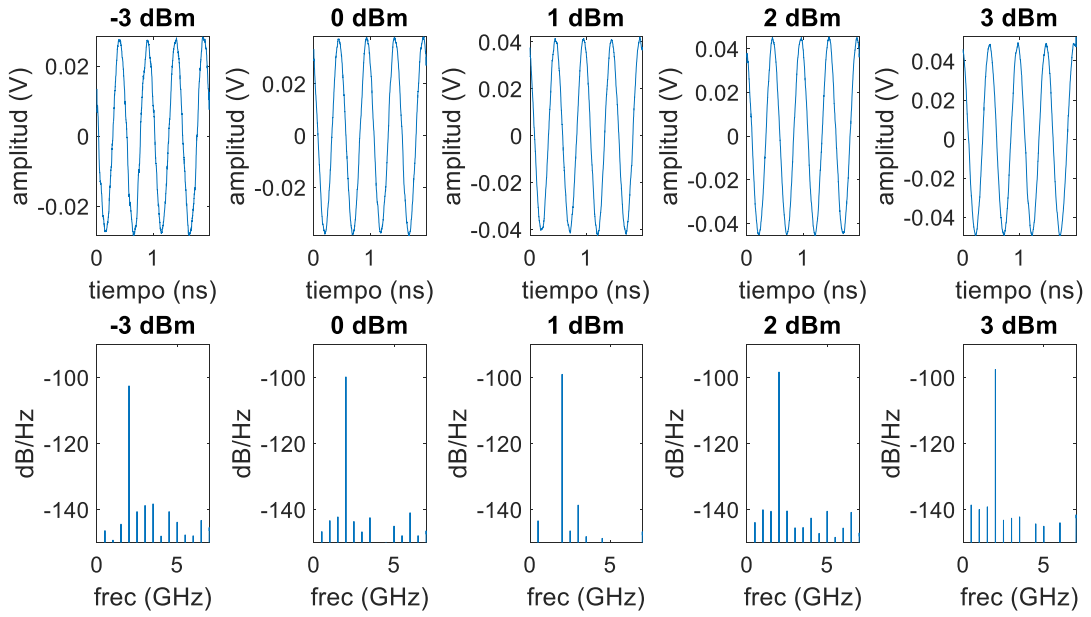
## (ii) Variación de potencia



**Figura IV.5:** Frecuencia RF 100 MHz



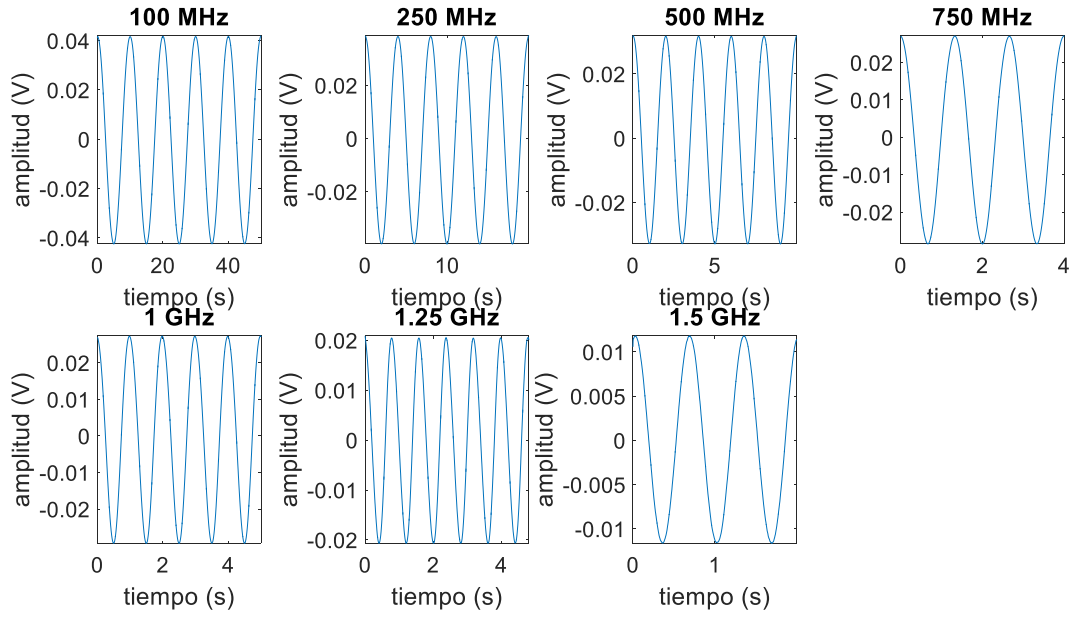
**Figura IV.6:** Frecuencia RF 1 GHz



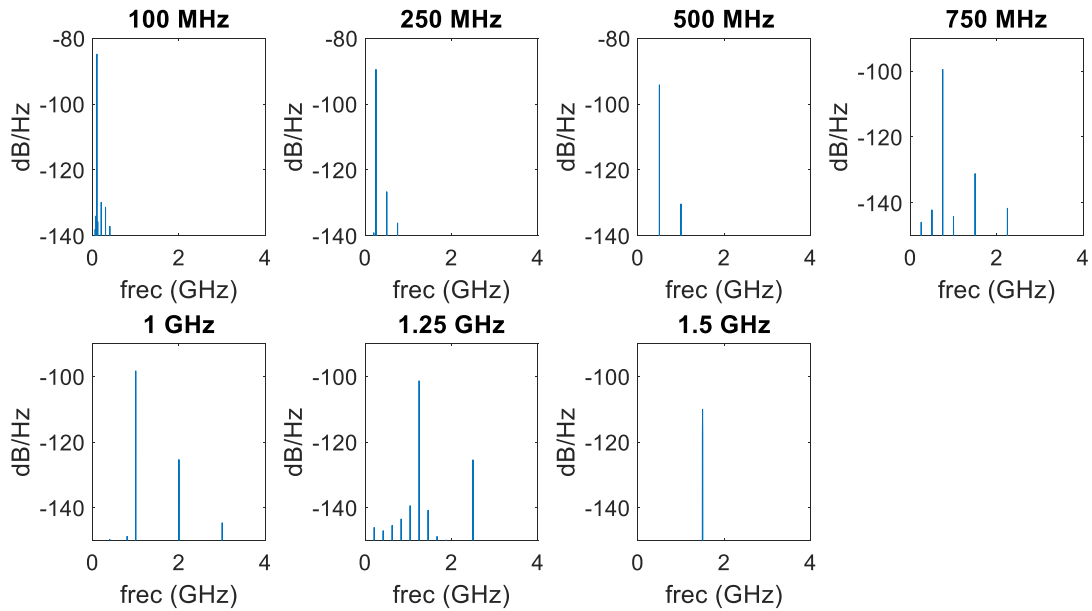
**Figura IV.7:** Frecuencia RF 2 GHz

**(b) Intensidad de polarización: 30 mA**

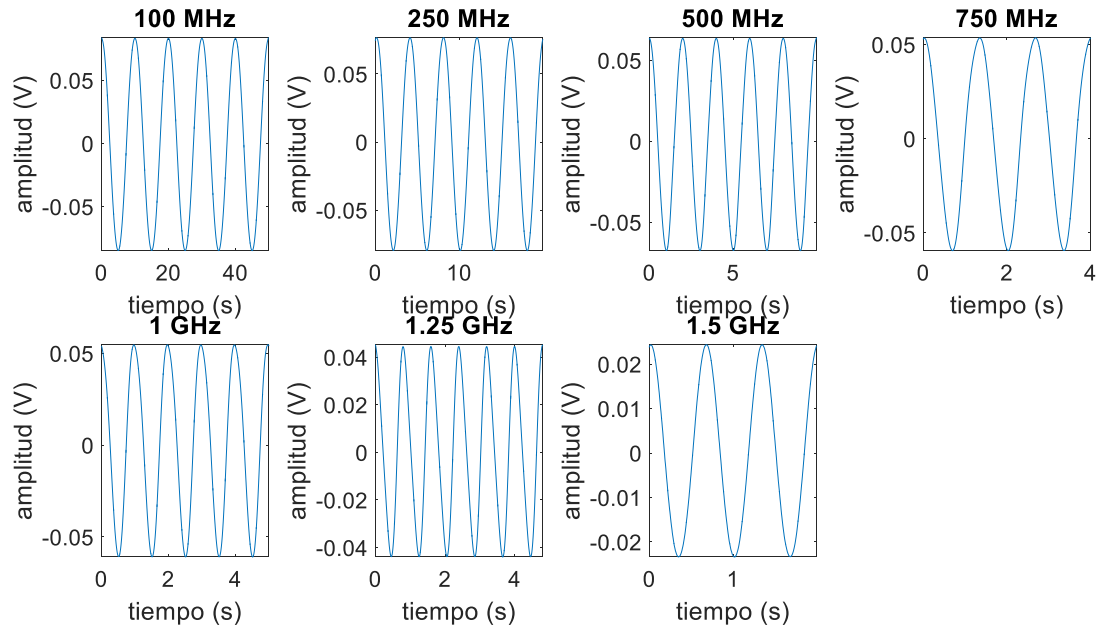
**(i) Variación de frecuencia**



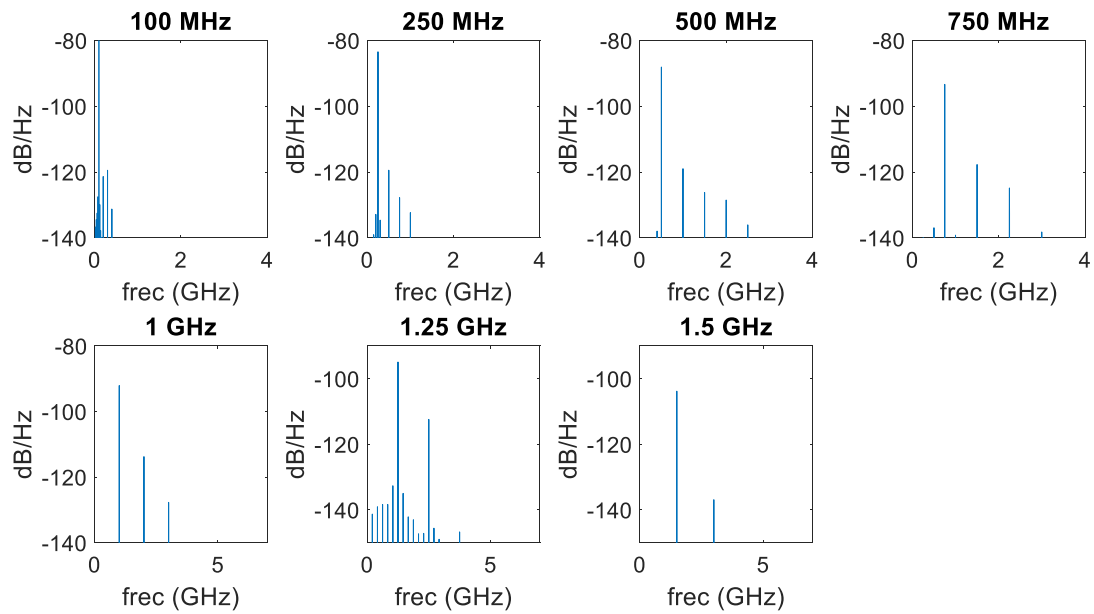
**Figura IV.8:** Potencia RF -3 dBm. Dominio temporal



**Figura IV.9:** Potencia RF -3 dBm. Dominio frecuencial

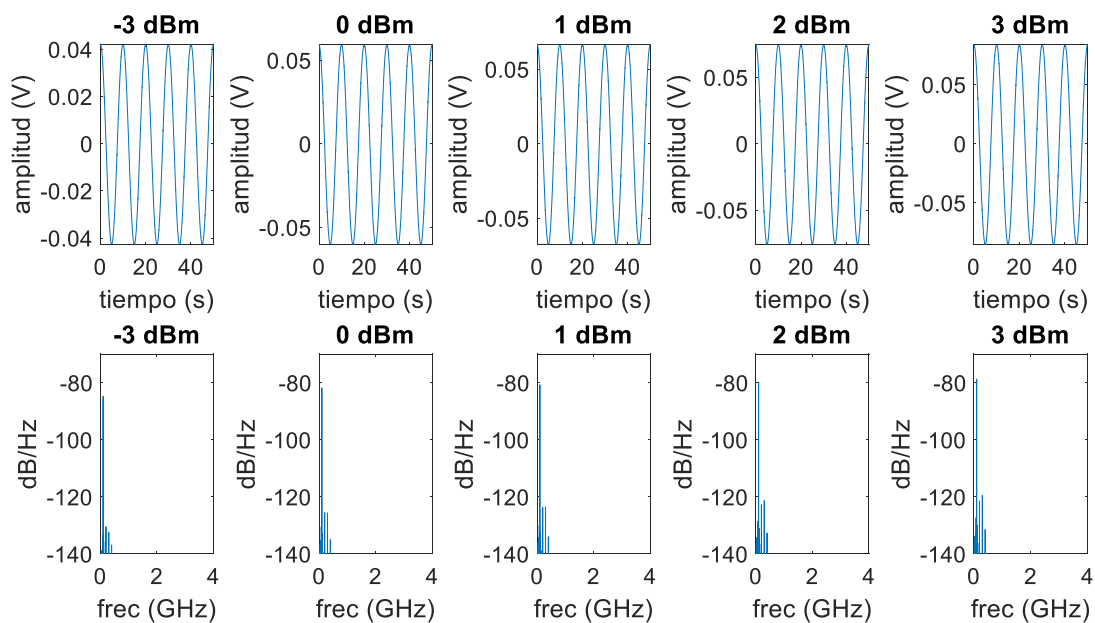


**Figura IV.10:** Potencia RF +3 dBm. Dominio temporal

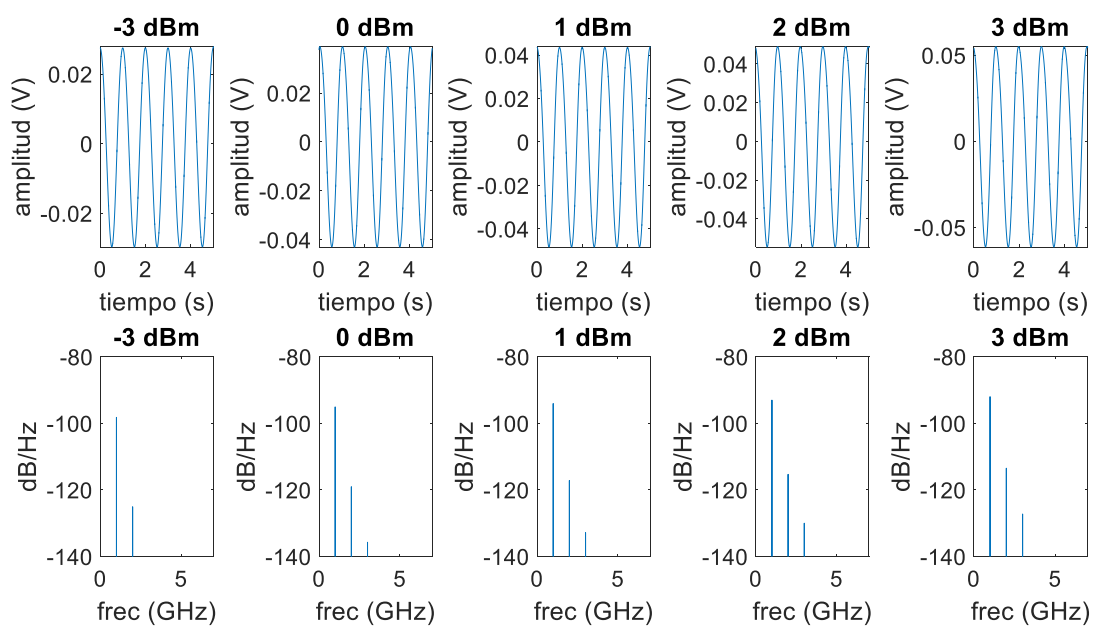


**Figura IV.11:** Potencia RF +3 dBm. Dominio frecuencial

## (ii) Variación de potencia



**Figura IV.12:** Frecuencia RF 100 MHz

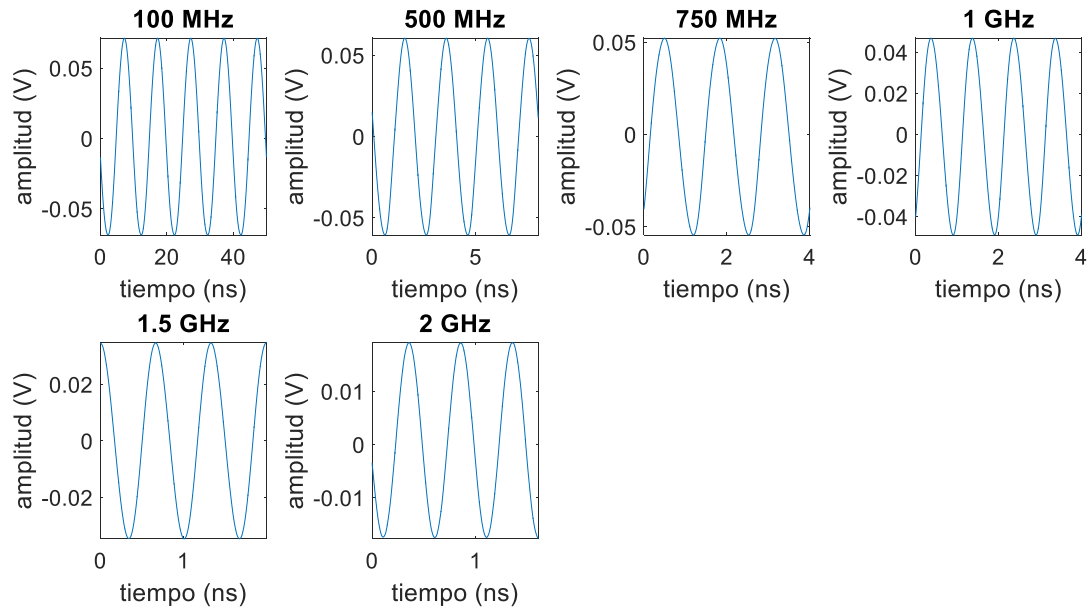


**Figura IV.13:** Frecuencia RF 1 GHz

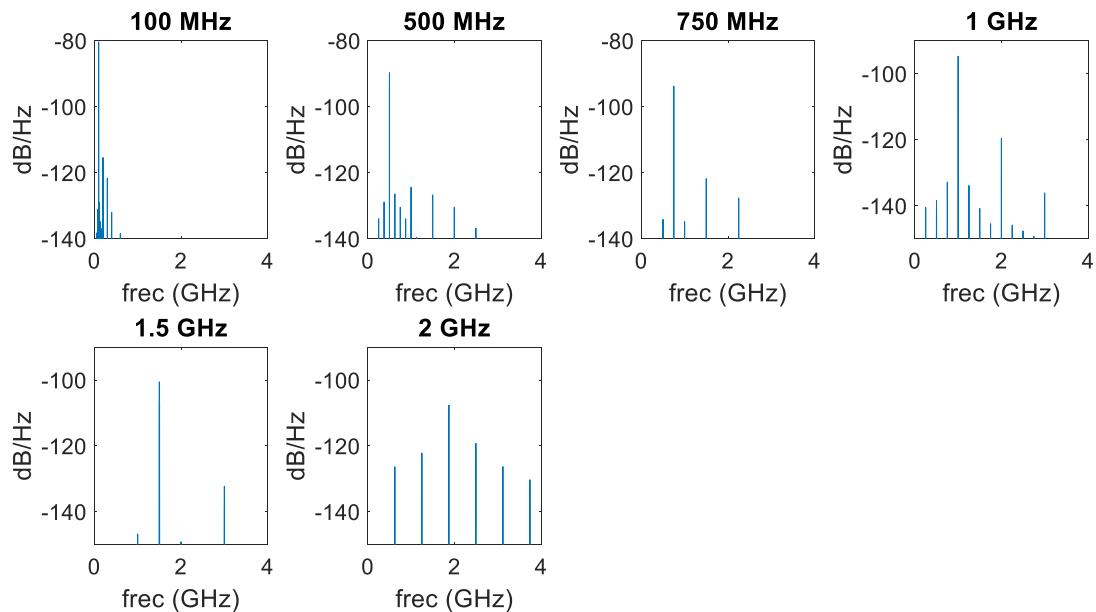
## IV.2 VL

Como ya se ha mencionado, el VL tiene la corriente de polarización fijada, pero al margen de esto, se realiza el mismo procedimiento: en primer lugar, la frecuencia varía entre 100 MHz y 2 GHz para dos valores de potencia de RF fijos, que son -3 y 0 dBm. En segundo lugar, la potencia de RF varía entre -4 y 0 dBm para dos valores de frecuencia fijos, que son 100 MHz y 1 GHz.

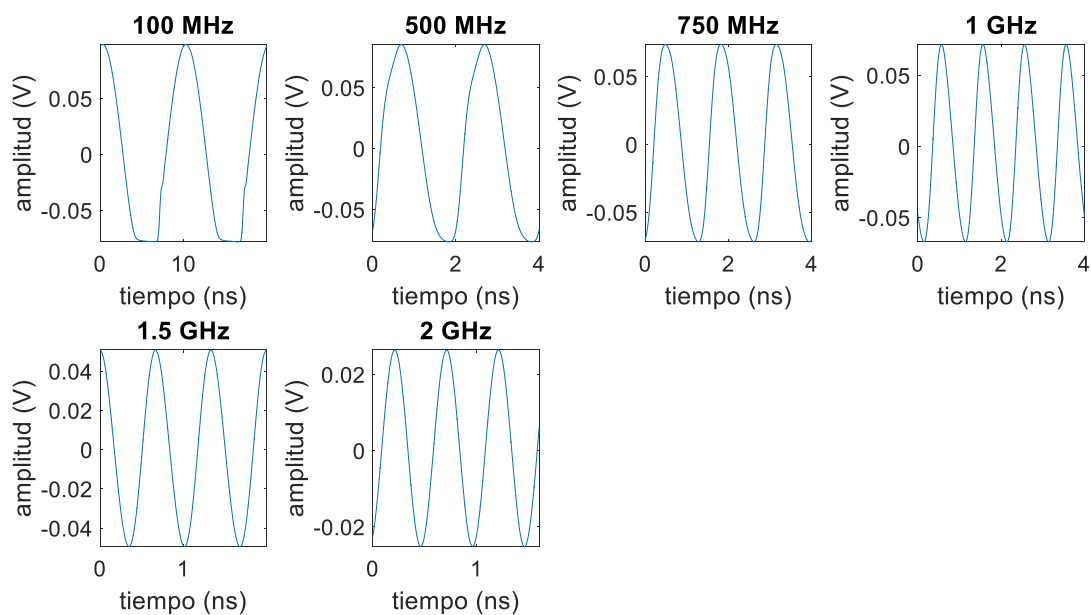
### (i) Variación de frecuencia



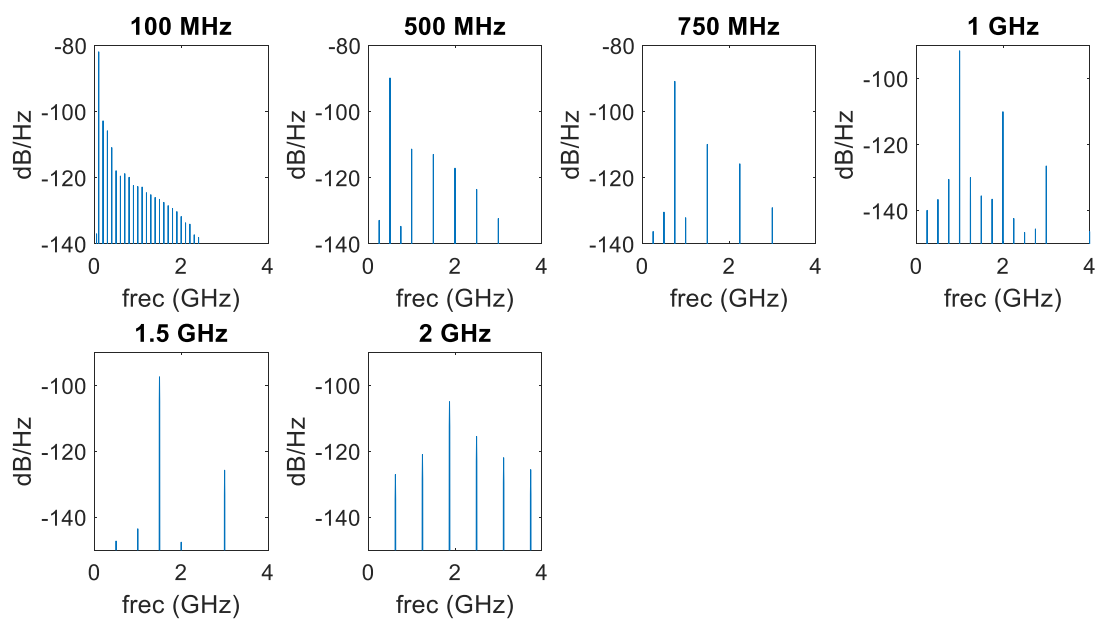
**Figura IV.14:** Potencia RF -3 dBm. Dominio temporal



**Figura IV.15:** Potencia RF -3 dBm. Dominio frecuencial

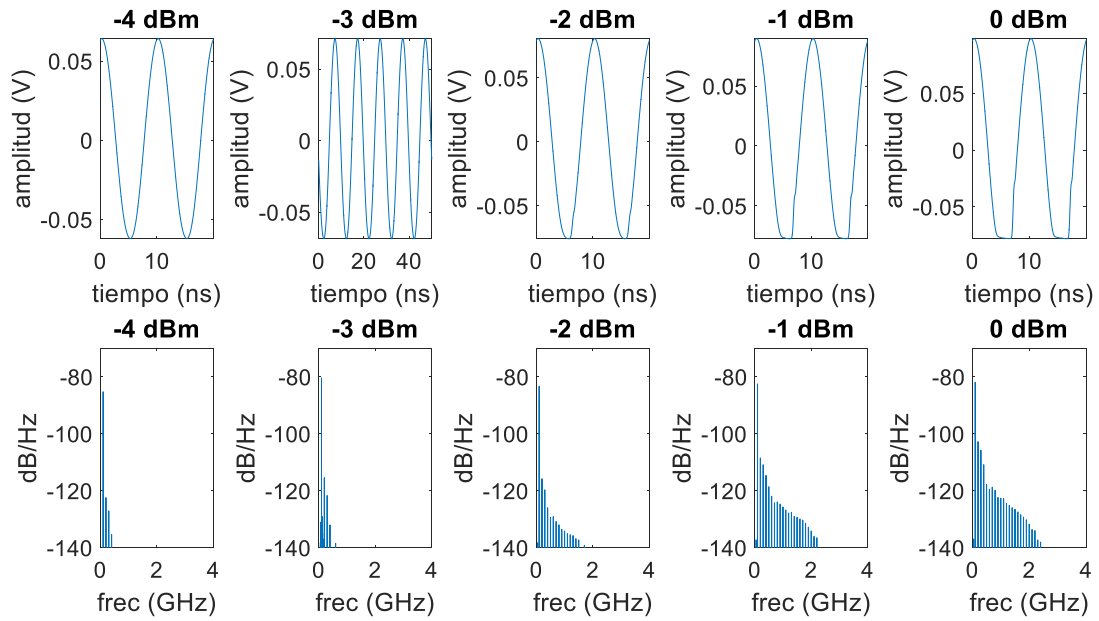


**Figura IV.16:** Potencia RF 0 dBm. Dominio temporal

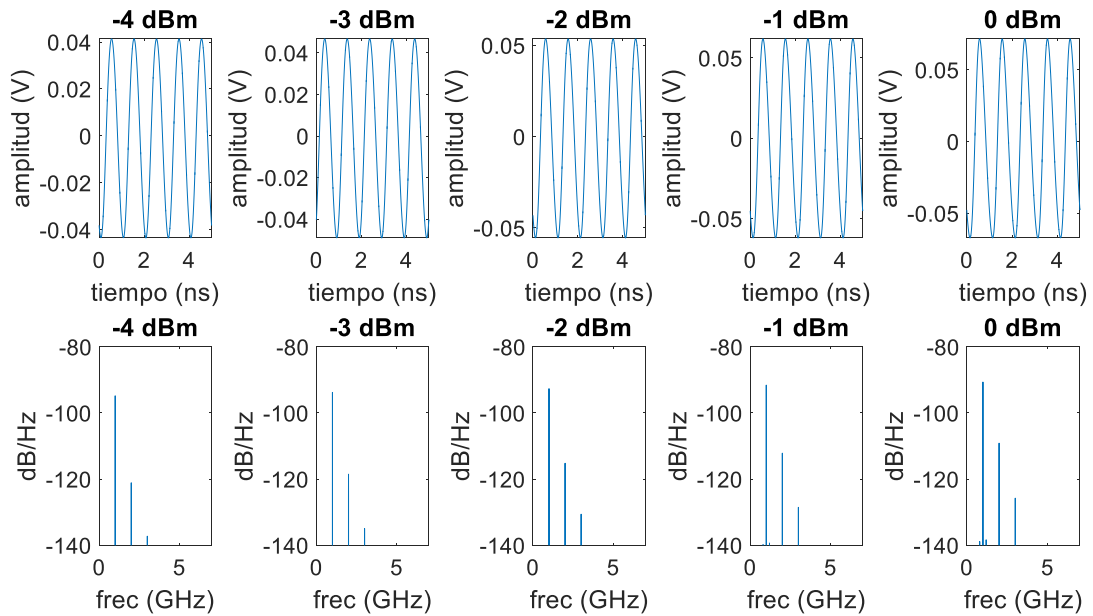


**Figura IV.17:** Potencia RF 0 dBm. Dominio frecuencial

**(ii) Variación de potencia**



**Figura IV.18:** Frecuencia RF 100 MHz



**Figura IV.19:** Frecuencia RF 1 GHz



## Anexo V. Manuales y hojas de características

### Dispositivos activos

- Láseres .....	77
• LD650P007 de Thorlabs .....	77
• LD658P040 de Thorlabs .....	79
• VL de Graviton .....	80
- Detector SPD-2 de Graviton .....	84
- Base de control de láser: LDM9T de Thorlabs .....	87
- Fuente de Intensidad LCD-200 .....	91

### Dispositivos pasivos y fibras

- Atenuador óptico de OZ Optics Ltd. ....	94
- OM-GIGA de Optimedia Inc. ....	96
- GH4001 de Mitsubishi .....	97
- BH4001 de Mitsubishi .....	100

### Equipos de medida

- Equipos FOTEC .....	105
- VNA E5071C de Agilent .....	108
- OptoBERT OPB3200 de Optellent .....	110
- Cámara QICAM FAST 1394CCD de Infiniium DCA 86100 <sup>a</sup> .....	114
- Osciloscopio Infiniium DCA 86100 <sup>a</sup> de Agilent .....	116

Product Specification Sheet

THORLABS

Laser Diode



L650P007



Description

Thorlabs Ø5.6 mm, TO-18 can package discrete laser diode is a compact light source suited to many applications. Our lasers are fully compatible with our entire line of Laser Diode and TEC Controllers as well as our selection of Laser Diode Mounts and Collimation Solutions.

Specifications

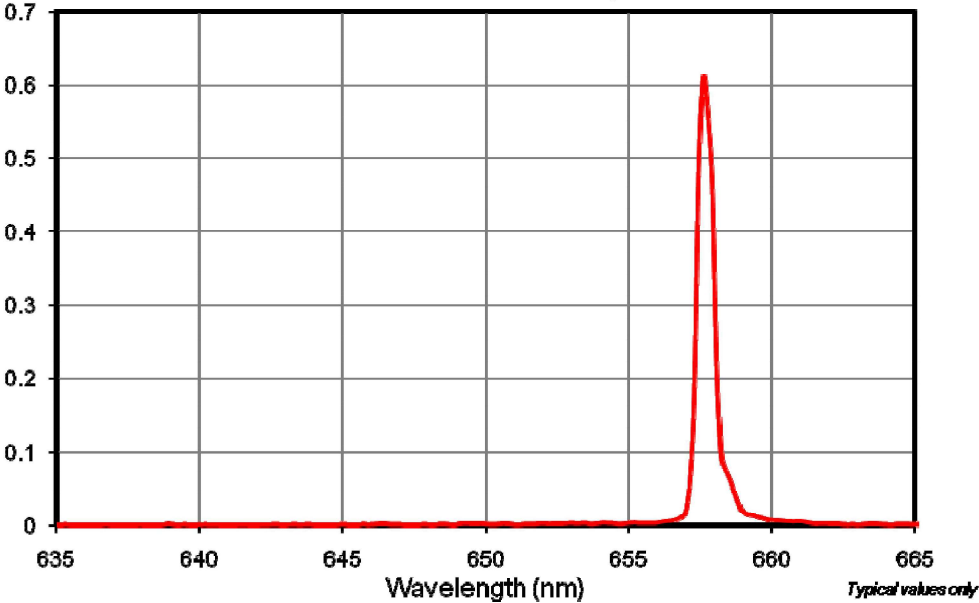
(P<sub>o</sub> = 7 mW, T<sub>c</sub> = 25 °C)

Specification	Symbol	Max
LD Reverse Voltage, V	V <sub>R(LD)</sub>	2
PD Reverse Voltage, V	V <sub>R(PD)</sub>	30
Operation Case Temperature, °C	T <sub>op</sub>	-10 to 70
Storage Temperature, °C	T <sub>STG</sub>	-40 to 85

Specification	Symbol	Min	Typ	Max
Wavelength, nm	λ <sub>p</sub>	640	650	660
Output Power, mW	P <sub>o</sub>	-	7	10
Threshold Current, mA	I <sub>th</sub>	-	20	25
Operation Current, mA	I <sub>op</sub>	-	28	35
Operating Voltage, V	V <sub>op</sub>	-	2.2	2.6
Beam Divergence, deg	θ <sub>  </sub>	5	9	12
	θ <sub>⊥</sub>	24	28	32
Slope Efficiency, mW/mA	η	0.6	1	1.3
Monitor Current, mA	I <sub>m</sub>	-	0.12	0.3
Astigmatism, μm	A <sub>s</sub>	-	-	15
Beam Angle Deviation, deg	θ <sub>  </sub>	-3	-	3
	θ <sub>⊥</sub>	-3	-	3
Emission Point Accuracy, μm	ΔX	-80		80
	ΔY	-80		80
	ΔZ	-80		80



L650P007 Normalized Output Power



21024-S01 Rev A – April 1, 2010  
Specifications subject to change without notice.

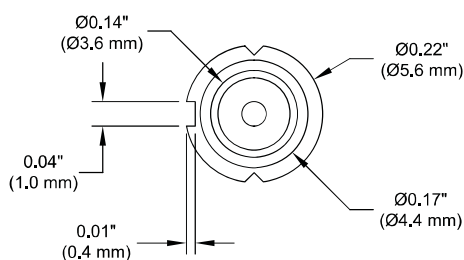
# Product Specification Sheet

**THORLABS**

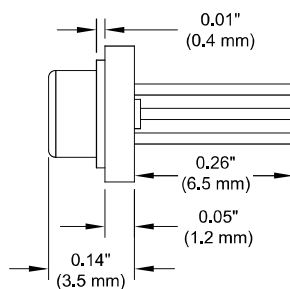
## Drawings



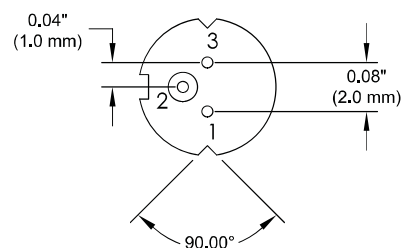
Top View



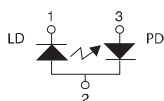
Side View



Bottom View



### Pin Code 5A



### Pin Description

- 1 Laser Cathode
- 2 Case Common
- 3 Monitor Diode Anode

### USA, Canada, and South America

Thorlabs, Inc.  
435 Route 206  
Newton, NJ 07860, USA

Tel: 973-579-7227  
Fax: 973-300-3600

### Europe

Thorlabs GmbH  
85221 Dachau, Germany  
Tel: +49-(0)8131-5956-0

### Scandinavia

Thorlabs Sweden AB  
431 35 Malmö, Sweden  
Tel: +46-31-733-30-00

### UK and Ireland

Thorlabs LTD.  
Cambridgeshire CB7 4EX, GB  
Tel: +44 (0)1353-654440

### Japan and Asia

Thorlabs Japan Inc.  
Nerima-ku, Tokyo 179-0981, Japan  
Tel: +81-3-6915-7701

### France

Thorlabs SAS  
78600 Maisons-Laffitte, France  
Tel: +33 (0) 970 444 844

### China

Thorlabs China  
Shanghai, China  
Tel: +86 (0)21-60561122



21024-S01Rev A — April 1, 2010

Specifications subject to change without notice.

# Product Specification Sheet

**THORLABS**

## Laser Diode



L658P040



### Description

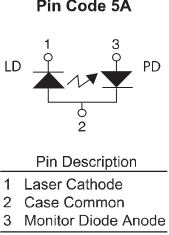
Thorlabs Ø5.6 mm, TO-18 can package discrete laser diode is a compact light source suited to many applications. Our lasers are fully compatible with our entire line of Laser Diode and TEC Controllers as well as our selection of Laser Diode Mounts and Collimation Solutions.

### Specifications

(P<sub>o</sub> = 40 mW, T<sub>c</sub> = 25 °C)

Specification	Symbol	Max
LD Reverse Voltage, V	V <sub>R(LD)</sub>	2
PD Reverse Voltage, V	V <sub>R(PD)</sub>	30
Operation Case Temperature, °C	T <sub>op</sub>	-10 to 70
Storage Temperature, °C	T <sub>STG</sub>	-40 to 85

Specification	Symbol	Min	Typ	Max
Wavelength, nm	λ <sub>p</sub>	648	658	668
Output Power, mW	P <sub>o</sub>	-	40	42
Threshold Current, mA	I <sub>th</sub>	-	35	55
Operation Current, mA	I <sub>op</sub>	-	75	110
Operating Voltage, V	V <sub>op</sub>	-	2.2	2.8
Beam Divergence, deg	θ <sub>  </sub>	5	10	12
	θ <sub>⊥</sub>	16	20	22
Slope Efficiency, mW/mA	η	0.5	0.8	1.2
Monitor Current, mA	I <sub>m</sub>	-	0.3	0.5
Astigmatism, μm	A <sub>s</sub>	-	-	15
Beam Angle Deviation, deg	θ <sub>  </sub>	-3	-	3
	θ <sub>⊥</sub>	-3	-	3
Emission Point Accuracy, μm	ΔX	-80	-	80
	ΔY	-80	-	80
	ΔZ	-80	-	80



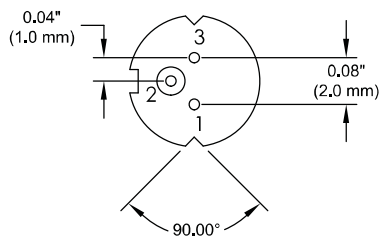
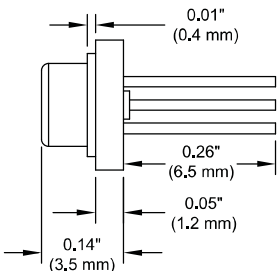
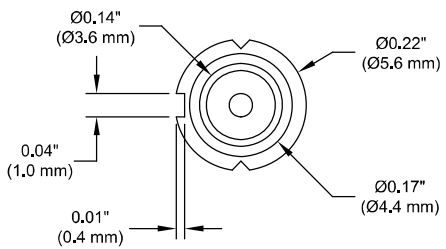
### Drawings



Top View

Side View

Bottom View



**USA, Canada, and South America**  
 Thorlabs, Inc.  
 435 Route 206  
 Newton, NJ 07860, USA  
 Tel: 973-579-7227  
 Fax: 973-300-3600

**Europe**  
 Thorlabs GmbH  
 85221 Dachau, Germany  
 Tel: +49-(0)8131-5956-0

**Scandinavia**  
 Thorlabs Sweden AB  
 400 20 Göteborg, Sweden  
 Tel: +46-(0)31-733-30-00

**UK and Ireland**  
 Thorlabs LTD.  
 Cambridgeshire CB7 4EX, GB  
 Tel: +44 (0)1353-654440

**Japan and Asia**  
 Thorlabs Japan Inc.  
 Bunkyo-ku, Tokyo 112-0012, Japan  
 Tel: +81-3-5979-8889

**France**  
 Thorlabs SAS  
 78600 Maisons-Laffitte, France  
 Tel: +33 (0) 970 444 844

**China**  
 Thorlabs China  
 Shanghai, China  
 Tel: +86 (0)21-32513486



21158-S01 Rev A – July 13, 2010  
 Specifications subject to change without notice.

# VL-850GI

850nm

2.5GHz E/O CONVERTER



Please read this manual carefully before use

Graviton INC

<http://www.graviton.co.jp/english/index.htm>

Page 1

## Introduction

Thank you for purchasing VL-850GI.

VL-850GI is Electric to Optical signal converter and has following feature.

- Very compact size and more than 0.2[mW] CW optical power at fiber end with no modulation. (With 5[m] length 50/125 fiber)
- Wide frequency range  
100kHz~2.5GHz Flatness  $\pm 2$ [dBe]
- Standard FC optical connector  
(Optional SC and ST connector are also available)
- Standard BNC plug  
Able to connect directly to a sweep generator or a network analyzer etc.
- Able to get DC power from instruments through included Power Cable Assembly.  
※It is not guaranteed that power cable corresponds to all instruments.
- Able to use for instrumentation of lightwave products, optical links or other various applications with O/E converter, PD&PA series.

Please read this user's manual carefully and use it appropriately according to this manual, will make this product useful for development of light wave equipments, lightwave communication converter or other various applications.

- ◇Do not re-produce or re-publishing a part or all this manual without written permission from Graviton Inc.
- ◇This manual is subject to change without notice.
- ◇Please follow exporting regulations/rules in individual countries when exporting this product to other countries.

Page 2

## !!! DANGER !!!

This Unit is Class 1A LASER Product. Please read and handle this product carefully to avoid eye damage.

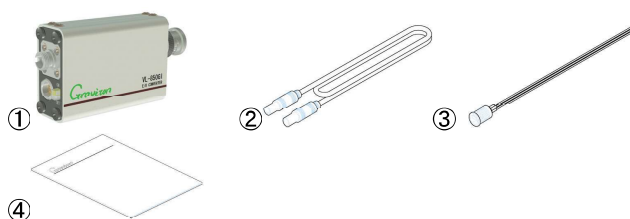
- ◇Do not the power switch on till both ends of the fiber cable and the power cable are connected properly.
- ◇Always keep the protect cap attached to the Optical Signal Output Connector when not in use.
- ◇Do not observe inside of the Optical Signal Output Connector directly. It may result permanent damage on eyes.
- ◇Do not observe optical signal output directly through an optical instrument such as magnifier etc.
- ◇Do not observe optical signal from the end of the optical cable, if the signal is emitted into open air.
- ◇Do not disassemble and/or modify this unit.

Page 3

## Contents of this package

The contents of this package are listed below.

Please contact immediately the shop you purchased this product, if there are any missing items found.



- ① E/O Converter
- ② Power Cable Assembly
- ③ Auxiliary Power Connector
- ④ User's Manual (This Manual)

◇Please keep original packaging, in case of re-shipping.

Page 4

## Front and rear panel view



### ① Power switch

This switch is for controlling power. Please on this switch after connecting power cable assembly to power connector (2) and keep this switch off when not in use.

### ② Power input connector

The power can be supplied from probe power connector that equipped with an instrument through the Power Cable Assembly. Or, alternately, external regulated power supply (not included) can be used through the Auxiliary Power Connector. Power supply voltage for VL-850 is +15[V]. **Applying over and/or wrong polarity may cause permanent damage.**

### ③ Optical signal output connector

Light signal comes out from this FC connector. Optional SC and ST connector models are also available. **Please keep protect cap attached with this unit, to this connector to avoid light emission inadvertently when not in use.**

### ④ Electrical modulation signal input connector

Modulation signal is supplied through this BNC connector and this unit has 50[Ω] input impedance. The modulation frequency range is 100[kHz] ~2.5[GHz].

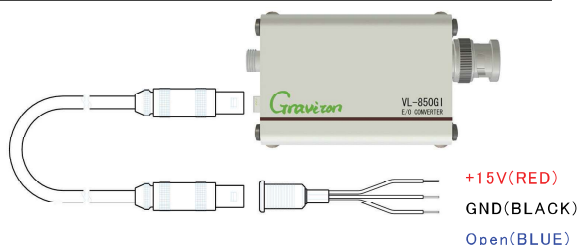
Page 5

- Adjust modulation level and frequency. Appropriate P-P modulation level is approximately 1/3 of conversion sensibility that is on the data sheet. Beyond this level makes the optical output signal lower than threshold level of Laser device causes clipping of the optical output signal. Applying higher than twice of the conversion sensibility may cause permanent damage.

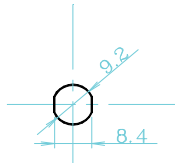
$$\text{Modulation Voltage [Vp - p]} \leq 2 \times \frac{\text{Output@end of the fiber [mW]}}{\text{Conversion Gain [mW/V]}}$$

- An external power supply is necessary, if an instrument going to use has no probe power output. The requirements for the power supply are regulated +15[V] ±5[%] and capable of supplying more than 100[mA] current with low ripple and noise. And connect as following figure.

Wrong power supply connection may cause permanent damage on the E/O converter. Please make sure the connection as **RED Cable for Positive terminal**, **Black Cable for Ground Terminal** and **Blue Cable for Open Terminal**.

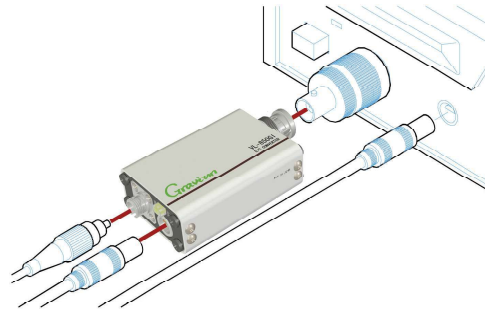


- Panel cutout size is as following to mount the Auxiliary I/O on a panel, if necessary. Maximum allowable thickness of the panel is 5mm.



Page7

## Setup



- First of all, connect the VL-850GI to output connector of an instrument. Conversion connector may be required, if the instrument has no BNC jack.

- Confirm power switch on VL-850GI is off then connect Power Cable Assembly supplied. Other side of the Power Cable can be connected to the instrument, if probe power connector is equipped. Please refer page 7 for connecting external power supply, if the instrument has no probe power connector.

- Connect fiber connector to optical signal output connector. CW optical power at fiber end with no modulation is more than 0.2[mW] with 50/125 GI fiber. Please use polished fiber of PC, SPC, UP, AdPC. Do not use APC polished fiber. Keep clean the end of the fiber. Quartz glass for reduction of return light in FC receptacle becomes dirty and will be broken, if dust goes into inside.

- Turn on the power switch. **Do not the power switch on without optical fiber cable connect both ends properly.**

Page 6

## Specifications

	VL-850GI
• Laser Device	VCSEL
• Wavelength	850±10[nm]

• Output power with no modulation	More than 0.2[mW] @ end of the fiber. (50/125GI Fiber 5[m] length)
• Optical Output Connector	FC receptacle (JIS F01)
• Modulation signal input connector	BNC Plug. Optionally SMA is available
• Input impedance	50[Ω]
• Modulation Sensibility	High than 0.25[mW/V]
• Modulation signal frequency range	100[KHz] ~2.5[GHz]
• Frequency response	±2[dB] within the frequency range above (300[KHz] is reference point)
• Power supply voltage	+15[V] ±5[%]
• Current consumption	Maximum 100[mA]
• Operational temperature	5[°C] ~35[°C]
• Storage temperature	-20[°C] ~50[°C]
• Dimension	L 93[mm], W 44[mm], H 21[mm] (Including the protect cap etc.)
• Weight	110[g]
Optional	
• OP01	SC or ST optical connector equipped model (Specification of these model may change without notice.)

Contact to: Graviton Inc.  
15-5 Kawaracho, Iruma-shi, Saitama, Japan 358-0008  
TEL : +81-4-2966-0816 FAX : +81-4-2966-0817  
"GRAVITON" is trade mark of Graviton Inc. in Japan.  
Copyright 2007 by Graviton Inc. All right reserved.  
Never reproduce or republish without written permission.

Page8

No. 070216-01



Model Type: VL-670GI ST Optical Connector, SMAJ RF Connector  
Serial Number: 160219

Laser Class: **Class 2**

Fig.1 Frequency Response (Graph)

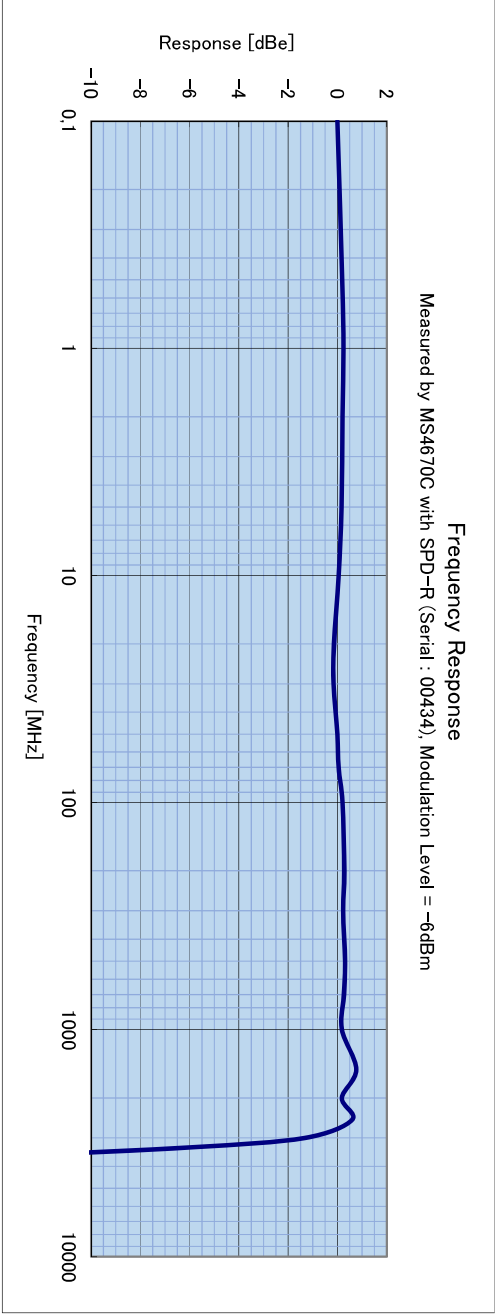


Table 2 CW Power & Modulation Gain

Item	Condition	Specifications	Measured Value
CW Power at Fiber End	Measured by AQ2201+AQ2200-241, 50GI Fiber 5m	> 0.2 [mW]	0.378 [mW]
CW Power at Connector	Measured by AQ2201+AQ2200-241, In front of Connector	---	0.421 [mW]
Coupling Efficiency	50GI Fiber 5m	> 50 [%]	89.8 [%]
Frequency Response	Up to 2.5GHz, 100MHz Reference	within +/-2 [dBe]	+0.59/-0.15 [dBe]
Modulation Gain at Fiber End	50GI Fiber 5m, 1MHz Square Wave *	> 0.25 [mW/V]	1.800 [mW/V]
Supply Current	+/-15V DC, No Signal	0.01 to 0.03 [A]	+0.02 [A]

\* 0.378mW / 0.210Vp-p = 1.800mW/V

Table 1 Freq. Response (Numeric)

Freq. [MHz]	Response [dBe]	Value [dB]
0.1	0.00	-0.19
0.5	0.20	0.01
1	0.25	0.06
2	0.20	0.02
5	0.17	-0.01
10	0.05	-0.14
20	-0.14	-0.32
30	-0.15	-0.34
50	-0.01	-0.19
70	0.05	-0.14
100	0.21	0.02
200	0.28	0.09
300	0.23	0.05
500	0.31	0.12
700	0.27	0.08
1000	0.18	0.00
1500	0.77	0.58
2000	0.18	-0.01
2500	0.59	0.41
3000	-1.33	-1.52
3300	-5.92	-6.10
3600	-13.16	-13.34

(Cal Attenuation = -40dB)

Measured on : 2019/10/03

Measured by : Mitsushiro Nagatomo



Model Type: VL-670G1 Frequency Response in Lower Frequency Region  
Serial Number: 160219

Laser Class: **Class 2**

Fig.1 Frequency Response (Graph)

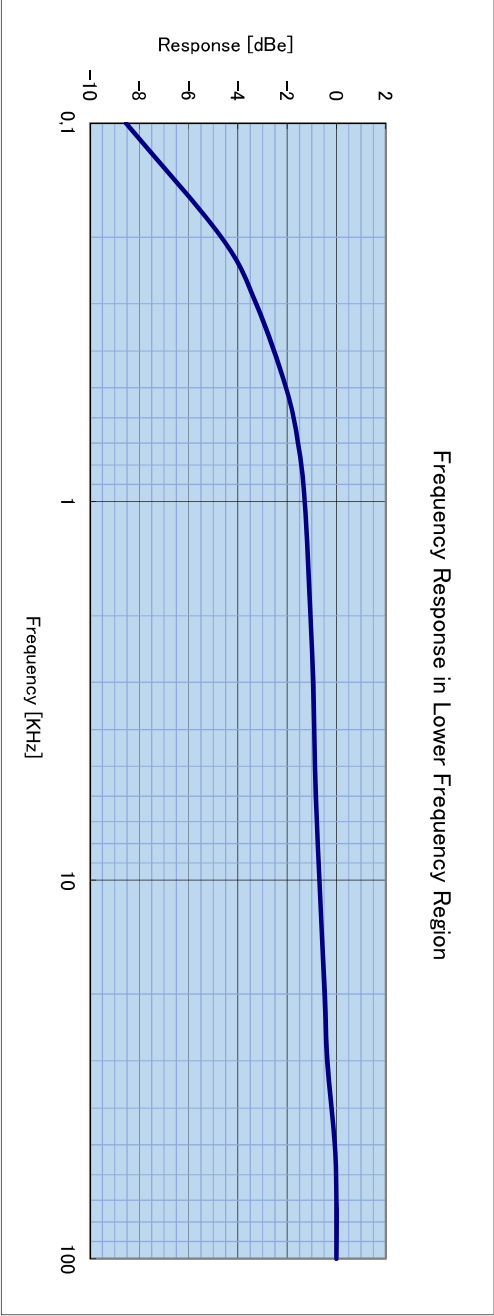


Table 1 Freq. Response (Numeric)

Freq. [KHz]	Response [dBe]	Value [Vp-p]
0.1	-8.54	0.098
0.2	-4.67	0.153
0.3	-3.26	0.180
0.5	-2.05	0.207
0.7	-1.56	0.219
1	-1.28	0.226
2	-1.06	0.232
3	-0.94	0.235
5	-0.87	0.237
7	-0.80	0.239
10	-0.69	0.242
20	-0.48	0.248
30	-0.37	0.251
50	-0.07	0.260
70	0.00	0.262
100	0.00	0.262

Item	Equipment and Condition		
Function Generator	WF1945B		
O/E Converter	SPD-3 (S/N:020904)		
Modulation Level	210mVp-p		
Oscilloscope	LT364L		

(Cal Attenuation = -40dB)  
Measured on : 2019/10/03  
Measured by : Mitsuhiko Nagatomo





No. 070129-01

## User's Manual

# PD Series

O/E CONVERTER

650nm version



Please read this manual carefully before use

### Model

SPD-1 650

SPD-2 650

Graviton INC

<http://www.graviton.co.jp/english/index.htm>

Page 1

## Introduction

Thank you for purchasing PD Series O/E Converter.

PD Series is Optical to Electric signal converter and has following feature.

- SPD-1 650 : 500mV/mW SPD-2 650 : 1000mV/mW (@ 650nm Wave Length, 50/125 GI Fiber)
- Wide Frequency Range  
DC~1200MHz Flatness +0.5 -3.0[dB electrical]

- Standard FC optical connector  
(Optional SC, F05, SMA, and ST connector are also available.)
- Standard BNC plug  
Able to connect directly to an oscilloscope, a spectrum analyzer etc.
- Able to get DC power from instruments through included Power Cable Assembly. It is not guaranteed that power cable corresponds to all instruments.
- Able to use for instrumentation of lightwave products, optical links or other various applications.

Please read this user's manual carefully and use it appropriately according to this manual, will make this product useful for development of light wave equipments, lightwave communication converter or other various applications.

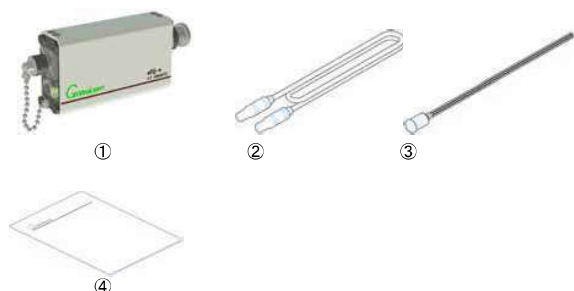
- ◇Do not re-produce or re-publishing a part or all this manual without written permission from Graviton Inc.
- ◇This manual is subject to change without notice.
- ◇Please follow exporting regulations/rules in individual countries when exporting this product to other countries.

Page 2

## Contents of this package

The contents of this package are listed below.

Please contact immediately the shop you purchased this product, if there is any missing items found.



- ① O/E converter
- ② Power Cable Assembly
- ③ Auxiliary Power Connector
- ④ User's Manual (this manual)

◇Please keep original packaging, in case of re-shipping.

Page 3

## Front and rear panel view



### ① Power switch

This switch is for controlling power. Please on/off this switch after connecting power cable assembly to power connector (2) also keep this switch off when not in use.

### ② Power input connector

The power can be supplied from probe power connector that equipped with an instrument through the Power Cable Assembly. Or, alternately, external regulated power supply (not included) can be used through the Auxiliary Power Connector. Power supply voltage for PD series is  $\pm 15[V]$ . Applying over and/or wrong polarity may cause permanent damage. Please refer the specification in page 7 for current consumption and page 5 for the detail of the power connection.

### ③ Optical signal input connector

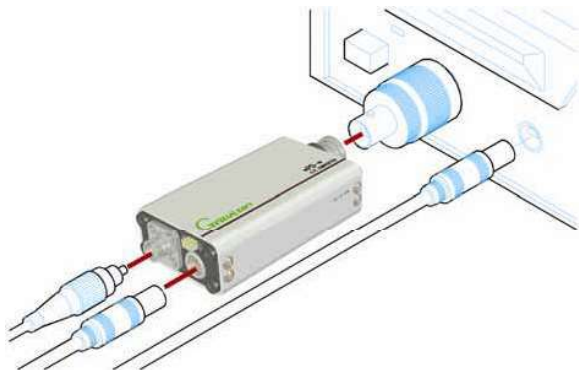
Light signal supplied through this FC connector is up to  $-1[dBm]$  for SPD-1 650 and up to  $-4[dBm]$  for SPD-2 650. Please do not apply 10dBm or higher light signal. It may cause permanent damage.

### ④ Electrical signal output connector

50[Ω] input impedance with wide frequency range instruments is suitable to observe light signal. Recommended to use wider frequency range instruments to withdraw full spec. (DC~1200MHz SPD-1 650 • SPD-2 650)

Page 4

Set up



1. First of all, connect the O/E converter to input connector of an instrument. Conversion connector may be required, if the instrument has no BNC jack.
2. Confirm power switch on the O/E converter is off then connect Power Cable Assembly supplied. Other side of the Power Cable can be connected to the instrument, if probe power connector is equipped. Please refer page 6 for connecting external power supply, if the instrument has no probe power connector.
3. Turn on the power switch.
4. Connect fiber connector to the O/E converter and adjust voltage and sweep time of the instrument observe the light signal. Also make sure 50[Ω] impedance is selected on the instrument.

Page 5

Specifications

Item	Test Condition	SPD-1 650	SPD-2 650
OE Device		Si PIN PD	Si PIN PD
Peak Sensitivity Wavelength		760nm	760nm
WaveLength Range	More than 1/5 of peak sens.	320nm ~ 1000nm	380nm ~ 1000nm
Conversion Gain	5061 Fiber	500mV/mW @650nm	1000mV/mW @650nm
Acceptable Core Diameter		Less than 0.8mm	Less than 1.0mm
Acceptable Fiber NA		Less than 0.2	Less than 0.25
Frequency Bandwidth	-3dB electrical	DC~1.2GHz	DC~1.2GHz
Maximum Optical Power for Proper Signal Output	400mW Out	-1dBm @650nm	-4dBm @650nm
Wideband Noise Voltage	Up to 12.4GHz	Less than 1.3mVrms	Less than 1.9mVrms
Noise Equivalent Power	650nm	Less than -26.0dBm	Less than -27.3dBm
Output Offset Voltage	No Input Signal	Within +/- 0.5mV	Within +/- 0.5mV
Output Impedance		50ohms	50ohms
Input Optical Connector		FC	FC
Output Coax Connector		BNC Plug	BNC Plug
Supply Voltage		+/-15V DC	+/-15V DC
Supply Current		+150mA/-50mA	+150mA/-50mA
Physical Dimension[mm]		93x44x21	103x44x21
Weight[g]		110	130

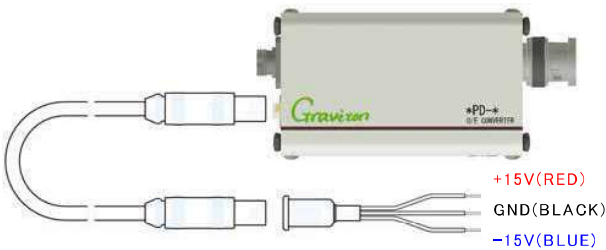
Operational Temperature +5[°C]~+35[°C] Storage temperature -20[°C]~+50[°C]  
(This specifications are subject to change without notice.)

Page 7

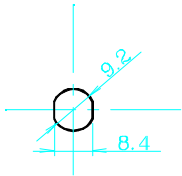
Connecting External Power Supply

1. An external power supply is necessary, if an instrument going to use has no probe power output. The requirements for the power supply are regulated  $\pm 15[V] \pm 5[ \% ]$  and capable of supplying more than 150[mA] current with low ripple and noise. And connect as following figure.

Wrong power supply connection may cause permanent damage on the O/E converter. Please make sure the connection as **RED Cable for Positive terminal**, **Black Cable for Ground Terminal** and **Blue Cable for Negative Terminal**.



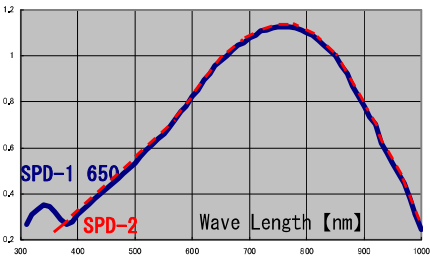
2. Panel cutout size is as following to mount the Auxiliary Power Connector on a panel, if necessary. Maximum allowable thickness of the panel is 5mm.



Page 6

The Spectral Sensitivity curve of SPD-1 650, SPD-2 650

(Reference point is 1 at 650nm)



Contact to: Graviton Inc.  
15-5 Kawaracho, Iruma-shi, Saitama, Japan, 358-0008  
TEL : +81-4-2966-0816 FAX : +81-4-2966-0817

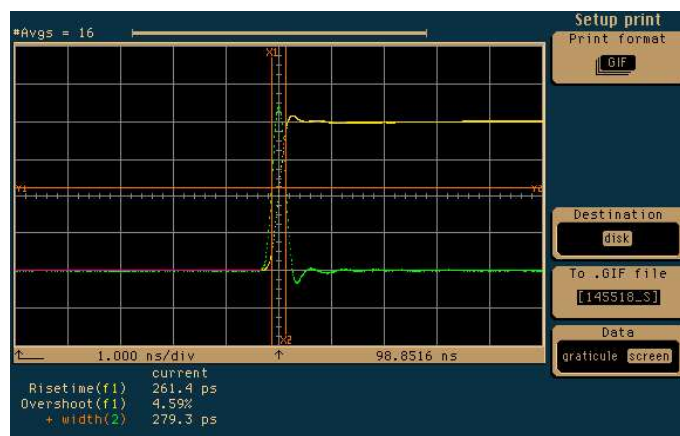
"GRAVITON" is trade mark of Graviton Inc. in Japan.  
Copyright 2006 by Graviton Inc. All right reserved.  
Never reproduce or republish this manual without written permission.

Page 8

No. 070129-01

**Model Type:** SPD-2 (650nm version)

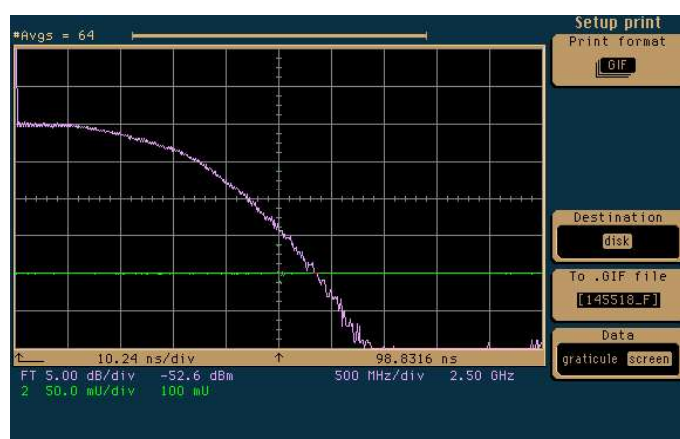
**Serial Number:** 145518 (ST Optical Connector, SMAJ\_Electrical\_Connector)



**Fig.1**  
**Impulse & Step Response**

X-axis: 1ns / div  
Y-axis: 50mV / div

Light Source: PLP-02  
Picosecond Light Pulser 780nm  
(Hamamatsu Photonics)  
Oscilloscope: 83480A+83485A  
Digital Communications Analyzer  
(Agilent Technology)



**Fig.2 Frequency Response**

(Calculated from the impulse response shown above)

X-axis: 500MHz / div  
Y-axis: 5dB/div  
Center Frequency: 2.5GHz

### Noise Level & DC Performance

Item	Specifications	Measured Value	Judgment
Wideband Noise Output Voltage (Up to 12.4GHz, AC Voltage)	Less than 1.90 mVrms	<b>1.61 mVrms</b>	OK
Output Offset Voltage	Within +/-0.5 mV	<b>+0.02 mV</b>	OK
Conversion Gain at 658nm (800um GI Fiber, NA = 0.2)	900 to 1100 V/W	<b>1,031 V/W</b>	OK
Conversion Gain at 658nm (1000um SI Fiber, NA = 0.2)	900 to 1100 V/W	<b>1,013 V/W</b>	OK
Positive Supply Current	0.09 to 0.11 A	<b>0.10 A</b>	OK
Negative Supply Current	0.01 to 0.03 A	<b>0.02 A</b>	OK

Evaluated on 2018/10/28  
Evaluated by Mitsuhiro Nagatomo



# **LDM9T**

## **Laser Mount with TEC and Controller**

### **User Guide**



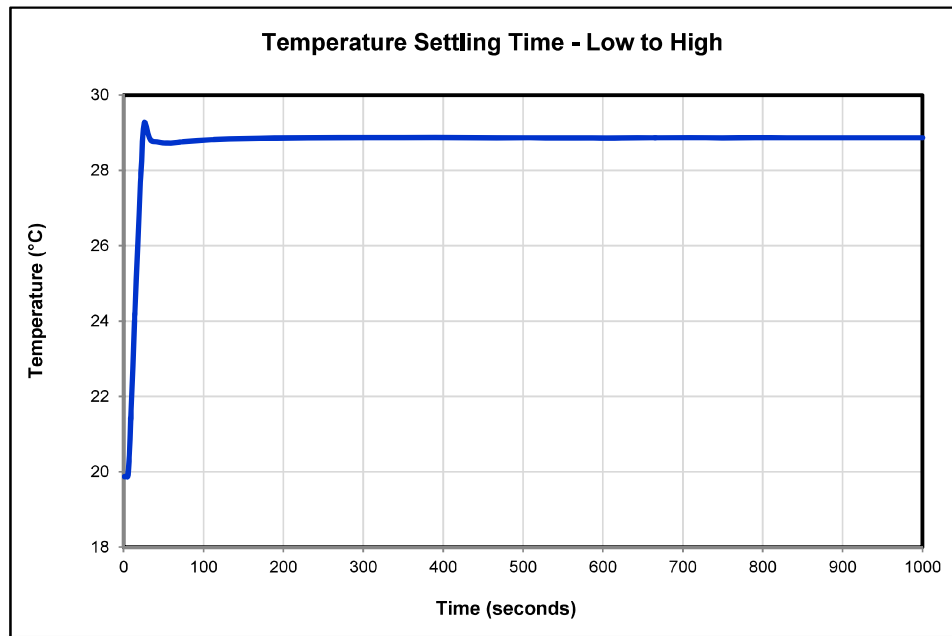
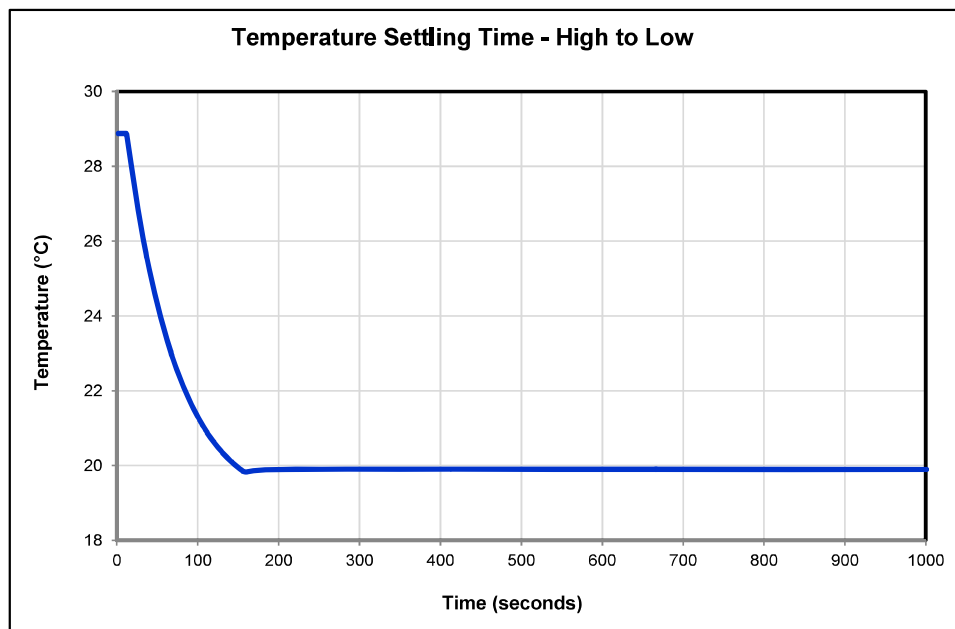
## Chapter 8 Specifications

Performance Specifications	
<b>Lasers Supported</b>	Ø5.6mm and Ø9mm Laser Diodes
<b>Max Laser Current</b>	200 mA ( $T_{\text{ambient}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , VLD = 3 V)
<b>Laser Diode Compliance Voltage</b>	7.5 V
<b>Laser Pin Configurations</b>	All LD Packages Except Style "F"
<b>LDC Modulation Frequency</b>	DC to 200 kHz
<b>RF Modulation Frequency*</b>	200 kHz to 1 GHz
<b>RF Input Impedance</b>	50 $\Omega$
<b>Maximum RF Power</b>	250 mW
<b>Maximum TEC Current</b>	1 A (Internally Regulated)
<b>TEC Heating/Cooling Capacity</b>	0.5 W ( $T_{\text{ambient}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , TLD = 20 $^{\circ}\text{C}$ ) See SOA Curve, page 12
<b>Typical Temperature Range</b>	20 to 30 $^{\circ}\text{C}$
<b>Temperature Stability</b>	<0.02 $^{\circ}\text{C}$ (1 hour) <0.05 $^{\circ}\text{C}$ (24 hour)
<b>Typical Settling Time</b>	<2 min heating, <3 min cooling
<b>Temperature Sensors</b>	10 k $\Omega$ Thermistor $\pm 2\%$ @ 25 $^{\circ}\text{C}$ , NTC
<b>Operating Temperature</b>	10 to 30 $^{\circ}\text{C}$
<b>Storage Temperature</b>	-20 to 70 $^{\circ}\text{C}$

\*Modulate Low Frequencies Through LD Controller

Power Supply Specifications	
<b>TEC Power Supply</b>	Desktop Switching Supply
<b>Supply Input</b>	12 W
<b>Supply Voltage Output</b>	5 VDC

Physical Specifications	
<b>Laser Polarity Select</b>	Internal Slide Switches
<b>Laser Interface</b>	DB9 Female
<b>Power Supply Connector</b>	2.5mm Power Jack
<b>RF Input Connector</b>	SMA Jack
<b>Interlock Connector</b>	2.5 mm Phono Jack
<b>Indicators</b>	LD Enabled Green LED, Power On Green LED
<b>Size (L x W x H)</b>	3.09" x 2.89" x 1.79" (78.4 mm x 73.3 mm x 45.5 mm)
<b>Weight</b>	0.56 lbs. (1.55 lbs. ship weight)
<b>Mounting Threads</b>	3x #8-32 (3x M4-0.5 for LDM9T/M)

**Typical Temperature Response Times**Figure 8 **Typical Heating Response**Figure 9 **Typical Cooling Response**

### RF Modulation

RF modulation can be accomplished in one of two ways. For low frequencies (below ~200 kHz), the RF modulator should be connected to the LD controller. Figure 10 shows the performance using the LDC202C. Above 200 kHz, the modulator should be connected to the mount's SMA connector. The mount has been tested up to 1 GHz, (see Figure 11 below).

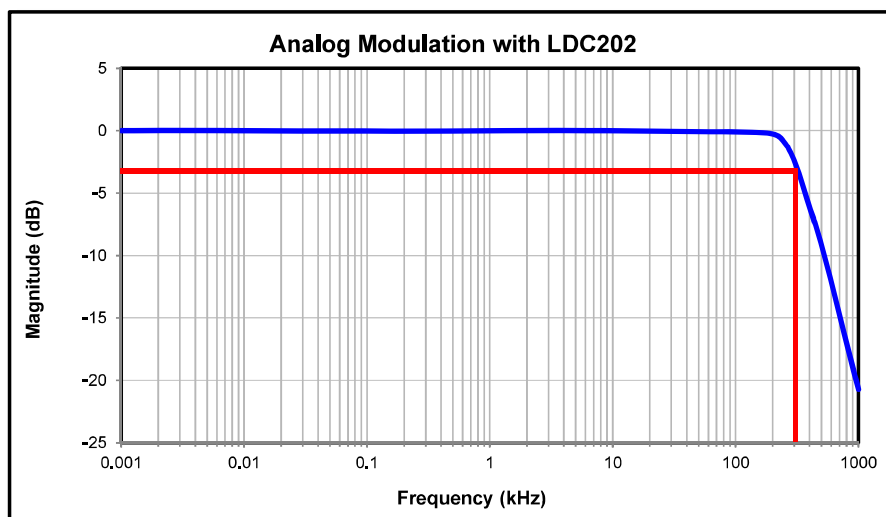


Figure 10 Low Frequency Modulation Through LD Controller

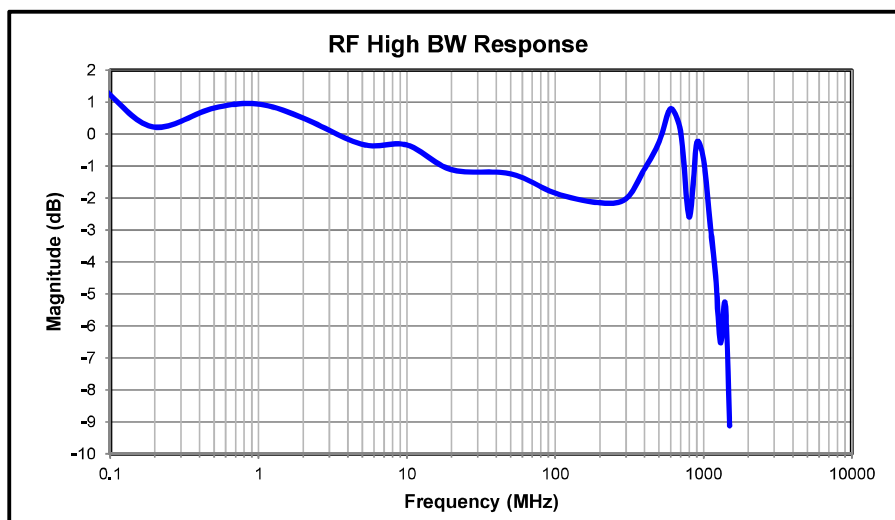


Figure 11 RF Modulation Through SMA Connector on LM9LP

**Operation Manual**

**Thorlabs Blueline™ Series**

**Laser Diode Controller**

**LDC2xx**



**2004**



## 1.5 Technical data

### 1.5.1 Common Data

(All technical data are valid at  $23 \pm 5^\circ\text{C}$  and  $45 \pm 15\%$  humidity)

#### Connectors:

Laser diode, photodiode, LD ON signal,	
interlock (0 ... 5 V) LD OUTPUT	9-pin D-Sub-jack
Modulation input (-10 V ... +10 V) MOD IN	BNC
Control output (0 ... 10 V) CTL OUT	BNC
Chassis ground	4 mm banana jack
Mains input	IEC 320

#### General data:

Line voltage	100 V / 115 V / 230 V (-10%, +15 %) (fixed)
Line frequency	50 ... 60 Hz

Power consumption (max.):

LDC200VCSEL	20VA
LDC201ULN	20 VA
LDC202	25 VA
LDC205	30 VA
LDC210	40 VA
LDC220	60 VA

Supply mains overvoltage	Category II (Cat II)
Operating temperature <sup>1)</sup>	0 ... +40 °C
Storage temperature	-40°C ... +70 °C
Relative Humidity	Max. 80% up to 31 °C, decreasing to 50% at 40 °C
Pollution Degree (indoor use only)	2
Operation altitude	< 3000 m
Warm-up time for rated accuracy	10 min
Weight	≤ 3 kg
Dimensions W x H x D	147 x 73 x 317 mm <sup>3</sup>

---

<sup>1)</sup> non condensing

### 1.5.2 Individual data LDC200VCSEL

#### Constant current mode:

Control range (continuously variable)	0 ... $\pm 20$ mA
Setting accuracy	$\pm 0.05$ mA
Resolution	1 $\mu$ A
Accuracy	$\pm 20$ $\mu$ A
Compliance voltage	> 6 V
Noise (10 Hz ... 10 MHz, typ.)	$\ll 1.5$ $\mu$ A
Ripple (50 Hz, rms, typ.)	$\ll 1.5$ $\mu$ A
Transients (typ.)	< 20 $\mu$ A
Short-time fluctuations (15 s, 0 ... 10 Hz, typ.)	< 5 $\mu$ A
Temperature coefficient	$\leq 50$ ppm/ $^{\circ}$ C
Drift (30 min, 0 ... 10 Hz, typ.)	$\leq 2$ $\mu$ A

#### Constant power mode:

Control range photodiode current	5 $\mu$ A ... 2 mA
Setting accuracy	$\pm 2$ $\mu$ A
Resolution photodiode current	0.1 $\mu$ A
Resolution optical power	1 $\mu$ W

#### Laser current limit:

Setting range	0 ... > 20 mA
Setting accuracy	$\pm 0.05$ mA
Resolution	1 $\mu$ A

#### Analog modulation/voltage control:

Input resistance	10 k $\Omega$
3dB-bandwidth (constant current)	DC ... 250 kHz
Modulation coefficient (CC)	2 mA/V $\pm 5\%$
Modulation coefficient (CP)	0.2 mA/V $\pm 5\%$

#### Control output ( $I_{LD}$ ):

Load resistance	$\geq 10$ k $\Omega$
Transfer coefficient	500 V/A $\pm 5\%$



## OZ OPTICS LTD.

219 Westbrook Rd.  
Ottawa, Ontario, Canada, K0A 1L0  
Tel: 613-831-0981 Toll Free: 1-800-361-5415 Fax: 613-836-5089  
Email: sales@ozoptics.com Website: www.ozoptics.com

### CERTIFICATE OF COMPLIANCE

#### Fiber Optic Attenuator

**Customer:** University of Zaragoza

**Work Order:** 202688

**PO#:** Q99786

**Part #:** BB-100-11-650-980/1000-M-25-XX-2.2-1

#### TEST CONDITIONS

	Wavelength(nm)	Input Fiber Size (µm)	Output Fiber Size (µm)
Setup 1	532	980/1000	980/1000
Setup 2			

#### RESULTS

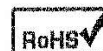
Attenuator Serial Number	Insertion Loss (dB)	SET UP #1		SET UP #2		Back Reflection (dB)	50 cm Drop Test (±dB change at 20dB attenuation)
		Attenuation Range (dB)	Back Reflection (dB)	Insertion Loss (dB)	Attenuation Range (dB)		
202688-01	2.80	IL to < -40	< -25				

#### NOTES

OZ Optics certifies that the above items have been assembled and tested at OZ Optics Ltd., and are in full compliance of all quoted specifications, drawings, and correspondence. Test results and other documentation of quality are kept at OZ Optics Ltd., and are available for review by the customer.

**Test Engineer:** Suzana Uzicanin

**Date:** 29 Aug 2016



## OPERATING INSTRUCTIONS FOR PIGTAIL STYLE VARIABLE ATTENUATORS USING THE BLOCKING TECHNIQUE:

The Attenuator is prealigned for optimum coupling efficiency in the factory. Remove the optional sealing cap to obtain access to the radial blocking screw. Rotate the radial screw clockwise to block the collimated beam between the two plates. Use the screwdriver provided to rotate the screw. Put the sealing cap back on the blocking screw. Tighten it until you feel firm resistance from the sealing gasket. **Do not over tighten.** The attenuator is bidirectional, but for optimum conditions use the end with the mounting holes as the input side.

**IMPORTANT: DO NOT ADJUST OTHER SCREWS.**

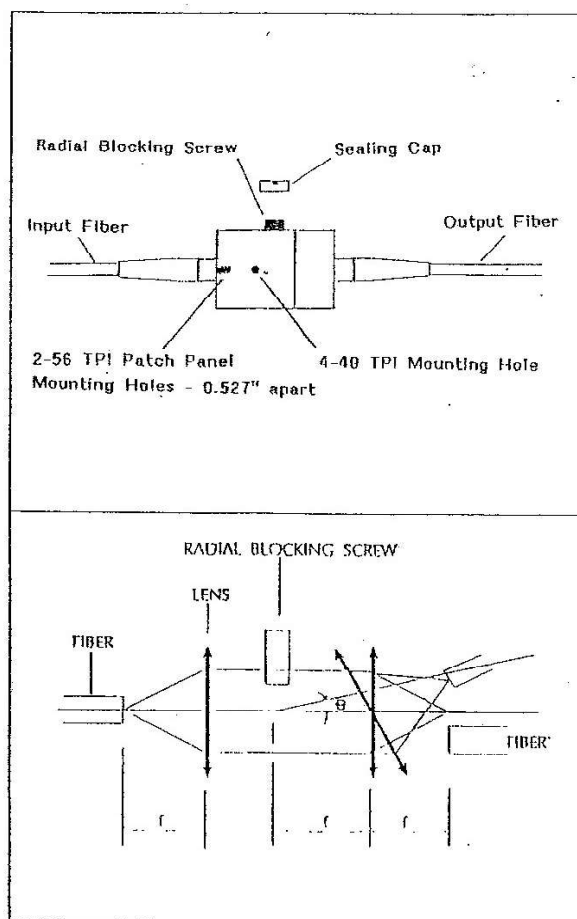


Figure 1. Operating principle of a variable attenuators using the blocking technique.

41N

# FiberFin®

## OM-Giga-SE100

### Graded-Index Plastic Optical Fiber



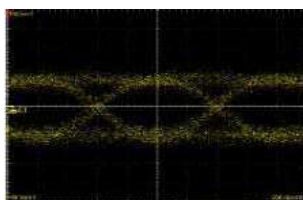
OM-Giga is a poly (methyl methacrylate)-based GI-POF for high-speed short-distance data-communication applications. It does not contain any refractive-index modifying dopant, and has excellent mechanical properties and thermal stability.

*This plastic fiber optic cable (PMMA) 1000 micron core, PE jacketed cable has a 2.2mm outer diameter jacket that can be used on any of our standard connectors, F05 Toslink, SMA, ST, Agilent and Light-Seal connectors. The SE100 can be easily terminated with any of the FiberFin hand tools or diamond finishing for that consistent high quality finish.*

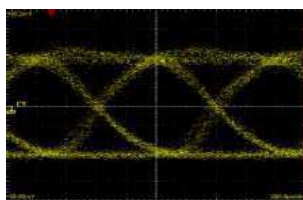
Property	Unit	SE-100	Remarks
Fiber Diameter ( <b>core</b> )	mm	1.00 ( <b>0.9</b> )	
Variation of Fiber Diameter	%	$\pm 5$	
Jacket Diameter	mm	2.2	
Variation of Jacket Diameter	%	$\pm 5$	
Jacket Material		Polyethylene	Black
Type of cable		Simplex	
Tensile Strength	N	> 70	at break
Bending Radius	mm	25	
Operating Temperature	°C	-30 ~ 70	
Attenuation *	dB/km	< 200	at 650 nm
Bandwidth	GHz	> 1.5	at 100 m

- Recommended for short-distance applications less than 50 meters
- Although longer distance is possible depending on the Tx-Rx used

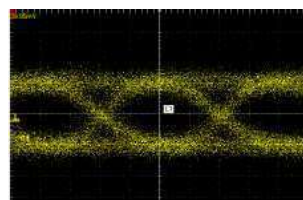
#### Eye – Pattern (Jacket Fiber)



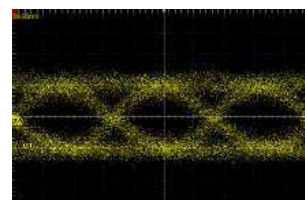
(a) 1.25 Gbps Back to Back



(b) 1.25 Gbps After 50m



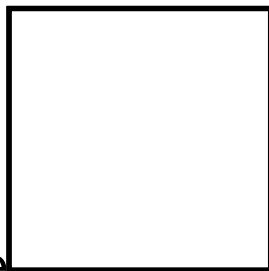
(c) 1.25 Gbps After 100m



(d) 1.5 Gbps After 100m

**For additional information or to purchase the product, please contact**

**FiberFin, Inc.** ([www.fiberfin.com](http://www.fiberfin.com))  
 201 Beaver Street,  
 Yorkville, Illinois USA  
 Sales 630-553-6924  
 Fax: 630-553-9025



## Specification Sheet

### GH 4001

ESKA PREMIER

Polyethylene Jacketed

Optical Fiber Cord

High - Performance Plastic Optical Fiber

**E s k a<sup>TM</sup>**

MITSUBISHI RAYON CO., LTD.  
ESKA OPTICAL FIBER DIVISION

6-41 Kounan 1-Chome, Minato-ku, Tokyo, Japan

Phone : + 81 - 3 - 5495 - 3060

Facsimile : + 81 - 3 - 5495 - 3212

## 1.Scope

This specification covers basic requirements for the structure, optical and mechanical performances of GH4001 .

## 2.Structure

Table1		GH 4001			
Item		Specification			
		Unit	Min.	Typ.	Max.
Optical Fiber	Core Material	—	Polymetyl - Methacrylate Resin		
	Cladding Material	—	Fluorinated Polymer		
	Core Refractive Index	—	1.49		
	Refractive Index Profile	—	Step Index		
	Numerical Aperture	—	0.5		
	Core Diameter	μm	920	980	1,040
	Cladding Diameter	μm	940	1,000	1,060
Jacket	Material and Color	—	Polyethylene		
	Diameter	mm	2.13	2.20	2.27
	Indication on the Jacket	—	ESKA PREMIER ; Pink color		
Approximate Weight		g / m	4		

ESKA PREMIER :Pink color

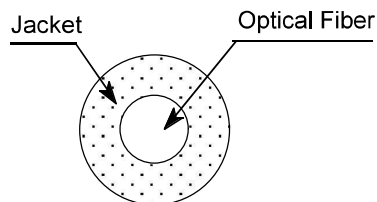
Sectional View

Table2			GH 4001			
Item		Acceptance Criterion and / or [Test Condition ]	Specification			
			Unit	Min.	Typ.	Max.
Maximum Rating	Storage Temperature	No Physical Deterioration [ in a Dry Atmosphere ]	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature	No Deterioration in Optical Properties* [ in a Dry Atmosphere ]	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature in a Moist Atmosphere	No Deterioration in Optical Properties** [ under 95 %RH ]	°C	—	—	+ 75
Optical Properties	Transmission Loss	φ50 nm Collimated Light ]	dB/km	—	—	170
	Transmission Loss under 95 %RH	φ50 nm Collimated Light ]	dB/km	—	—	190
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment =< 0.5 dB [ A Quarter Bend ]	mm	25	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment =< 1 dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	Times	10,000	—	—
	Tensile Strength	[Tensile Force at 5Åi Elongation; in Conformity to the JIS C 6861 ]	N	70	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment =< 1 dB [ Sample Length : 1 m Tensile Force : 4.9 N ]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment =< 1 dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	N.m	0.4	—	—

All tests are carried out under temperature of 25°C unless otherwise specified.

\* Attenuation increase shall be within 10 % after 1,000 hours.

\*\* Attenuation increase shall be within 10 % after 1,000 hours, except that due to absorbed water .

The specification is subject to change without notice.

The information contained herein is presented as a guide for the product selection. Please contact our business department for the issue of an official specification sheet.



# Specification Sheet

BH-4001

High-Performance Plastic Optical Fiber

E s k a™

**MITSUBISHI RAYON CO.,LTD.**

ESKA OPTICAL FIBER DIVISION

1-1, Marunouchi 1-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8253, Japan

Phone : +81-3-6748-7518

Facsimile : +81-3-3286-1366

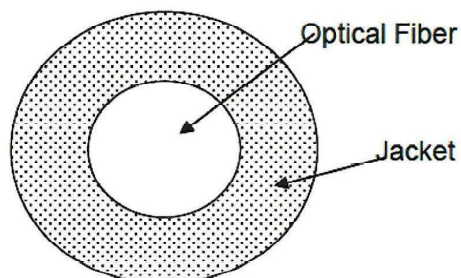
1. Scope  
This specification covers basic requirements for the structure and optical performances of BH-4001.

2. Structure

Table 1

		BH-4001			
Item		Specification			
		Unit	Min.	Typ.	Max.
Optical Fiber	Core Material	—	Polymethyl-Methacrylate Resin		
	Cladding Material	—	Fluorinated Polymer		
	Core Refractive Index	—	1.49		
	Refractive Index Profile	—	Step Index		
	Numerical Aperture	—	0.58		
	Core Diameter	μm	920	980	1,040
	Cladding Diameter	μm	940	1,000	1,060
Jacket	Material	—	Crosslinked Polyethylene		
	Color	—	Black		
	Diameter	mm	2.13	2.18	2.23
Approximate Weight		g/m	4		
Indication on the Product		—	None		

Sectional View



## 3. Performances

Table 2

		BH-4001				
Item		Acceptance Criterion and/or [ Test Condition ]	Specification			
			Unit	Min.	Typ.	Max.
Maximum Rating	Storage Temperature	No Physical Deterioration [ in a Dry Atmosphere ]	°C	-55	—	+105
	Operation Temperature	No Deterioration in Optical Properties* [ in a Dry Atmosphere ]	°C	-55	—	+105
		No Deterioration in Optical Properties** [ under 95%RH condition ]	°C	—	—	+85
Optical Properties	Transmission Loss [ 650nm Collimated Light ]	[ 25°C 50%RH ]	dB/km	—	—	200
		[ Operation Temperature ]	dB/km	—	—	250
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment $\leq 0.5\text{dB}$ [ A Quarter Bend ]	mm	15	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment $\leq 1\text{dB}$ [ in Conformity to the JIS C 6861 ]***	Times	1,000	—	—
	Tensile Strength	Tensile Force at 5% Elongation [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	N	70	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment $\leq 1\text{dB}$ [ Sample Length : 1m Tensile Force : 4.9N ]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment $\leq 1\text{dB}$ [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	N·m	0.4	—	—

All tests are carried out under temperature of 25°C unless otherwise specified.

\* Attenuation change shall be within +/- 10% after 1,000 hours.

\*\* Attenuation change shall be within +/- 10% after 1,000 hours, except that due to absorbed water.

\*\*\* Bend Angle +/-90°, Bend Radius 15mm, Tension 500g

## 4. Revision

REVISION No.	DATE	REMARK	DRAWN	APPVD
	May-23-2013	new issue	Takenaka	Okita

## Typical cautions when handling POF

Mitsubishi Rayon Co., Ltd.

### (1) Cautions on its application

- 1) Please do not use the optical fiber ESKA™ inside the human body, or for any application where it will come into direct contact with food.
- 2) When connecting to a light source with a very high brightness, such as halogen lamps and collected sunlight, use a heat source cut filter or cooling devices to keep the temperature from rising. Make sure to use the line within the specified operating temperature range.
- 3) When installing the optical fiber ESKA™, follow the laws and regulations of the country or region where it is used.

### (2) Usage Environment, Cautions in Storage Conditions

The optical fiber ESKA™ is flammable. Make sure to use and store the line at the specified temperature range for each type.

- 1) Do not use open flames near or around the optical fiber ESKA™.
- 2) Do not use the optical fiber ESKA™ in a location where there is a lot of dirt or dust. If the end face of the optical fiber gets contaminated with dust or dirt, it can reduce optical characteristics.

Also, when a very strong light is concentrated, the dust or dirt may heat up and deform the end of the optical fiber or cause it to ignite into flames.

- 3) Place any remaining ESKA™ optical fibers in the container casing for storage.

### (3) Cautions Regarding Solvents and Chemicals

1) For cleaning of the ESKA™ optical fiber, use water or a diluted neutral detergent. If a different detergent has been used, make sure to wash it off completely with running water.

2) Select bonding adhesives by performing adequate application testing before usage.

3) The surface ESKA™ optical fiber must be cleaned of all solvents and oil before bonding.

Failure to do so could result in adverse effects to its optical and mechanical characteristics.

### (4) Cautions for Disposal

Make sure to have an industrial waste processing company with furnace facilities that can process hydrogen fluoride gas and hydrogen chloride gas perform the disposal of the optical fiber ESKA™.

If you dispose of the optical lines on your own, follow the laws of your country or region. Burning ESKA™ optical fibers will produce a corrosive and toxic hydrogen fluoride gas, and burning the vinyl chloride insulation cables will produce corrosive and toxic hydrogen chloride gas.



**fotec** *the fiber optic test equipment company*

## Lite Fiber Optic Test Kits

### Features

Includes Smart FO Power Meter and Mini LED or laser source

FOTest Lite Software for datalogging

Tests all networks and cable plants

New Versions for Gigabit Ethernet

Low Cost

### Applications

Measure optical power or loss

Troubleshooting networks

The Fotec Lite Test Kit is the first low cost fiber optic test kit that offers PC interfacing and simple datalogging options. The T570 includes everything needed for testing multimode or singlemode fiber optic networks and cable plants, but costs much less than any comparable product.

The Fotec Lite Kit can offer high performance with low cost by combining a Fotec Smart FO power meter which includes data acquisition features with a low cost Mini source. The Lite Kit fits between the "no frills" Mini test kits and the highly versatile, automated Smart test kits from Fotec.

The Lite Kit includes a Fotec FM300 series FO power meter which is the most advanced handheld meter available. It uses digital signal processing (DSP) to allow switching display resolution from 0.1 to 0.01 dB when higher resolution is needed. It's RS232 interface plugs into any PC and the FOTest Lite software provided can bring data from the meter into the PC for storage, formatting into reports or printing. The T570 Lite Kit uses the FM310 Smart power meter (850,1300,1550nm) and the S770 Mini LED source(850,1300nm) for testing multimode fibers (and the 1300 can be used with singlemode fibers up to 5 km long.) A FOtracer is also included for visual tracing and continuity checking.

The T595 Lite Kit uses the S795 Mini laser source (1300,1550nm)with the FM310 Smart power meter(850,1300,1550nm) for singlemode fiber. The source also has 2 kHz modulation for use with fiber identifiers.

For short wavelength and plastic fiber applications the T565 uses the S765 Mini LED source(665,850nm) with the FM300 Smart power meter(665,790,850nm).

To allow simple data acquisition, the Fotec Lite Kit can output data to a personal computer. The Lite Kit includes FOTest Fotec's powerful fiber optic test software for fiber optic test data acquisition.



### Ordering Guide

Test Kit	Meter	Source	Wavelengths	Fibers	Applications
T565	FM300	S765	665, 850	MM	Basic LAN/Datacom, POF
T570	FM310	S770	850, 1300	MM	Versatile LAN/Datacom
T580*	FM310	S770	850,1300 LED	SM & MM	Versatile LAN/Datacom Telco,CATV
		S780	1300 Laser		
T585*	FM310	S770	850,1300 LED	SM & MM	Versatile LAN/Datacom Telco,CATV
		S795	1300,1550 Laser		

T595*	FM310	S795	1300, 1550	SM	Telco,CATV
T1000-SX	FM310	S785	850 nm VCSEL	MM	Gigabit Ethernet
T1000-SLX	FM310	S785 S780	850 nm VCSEL 1300 nm Laser	SM & MM	Gigabit Ethernet

\*Specify Connector ST/SC/FC

### Smart Power Meters

Model	Detector	Cal Wavelengths(nm)	Operating Ranges
FM300	Silicon	665,790,850	+10 to -70 dBm
			0.001 w to 10mw
FM310	Germanium	850,1300,1550	+10 to -65 dBm
			0.001 w to 10mw

### Performance

Selectable resolution: 0.1 or 0.01 dB

Accuracy: +/-5%(W), +/-0.2 dB

(CATV : +/-0.4 dB) Calibrated to NIST Standards

Temperature coefficient: 0.1%/C

Operating temperature range:-10 to 50 C

Storage temperature range:-30 to 60 C

### Controls:

Power ON/OFF

Calibration wavelength (also selects display resolution)

Measurement ranges (also sets dB reference level)

**Computer interface:** RS-232 on RJ-11, 9600 baud

**Power:** 9v Battery life 20 hrs., input for AC adapter

### Minisources

Model	Wavelength	Type	Power(dBm)	Fiber	Connectors, comments
S760	665	LED	-20	POF	Modular adapter
S765	665 & 850	LED	-20	MM, POF	ST , incl. FOtracer
S770	850,1300	LED	-20	MM	ST
S779	790	Laser	-6	MM	FC conn only
S780	1300	Laser	-6	SM	ST/FC/SC, CW/2 kHz
S785	850	VCSEL	-6	MM	SC Gigabit & Ethernet
S790*	1550	Laser	-6	SM	ST/FC/SC, CW/2 kHz
S795*	1300 & 1550	Laser	-6	SM	ST/FC/SC, CW/2 kHz

\*Specify Connector ST/SC/FC

**Output power :** Adjustable over a 10 dB range to max power shown.

**Laser modulation:** CW and 2 kHz for use with fiber identifiers

**Controls:**

Output power: adjustable, trimpot

OFF/Wavelength (LEDs)

OFF/CW/2kHz (Lasers)

Wavelength select (S795 only)

**Power:** 9V battery, 4 hr. life, Jack provided for AC adapter.

AC adapter Included : A108 (120VAC), A110 (220-240VAC)

(A108 is supplied with all laser sources and Test Kits)

**Size:** LED Sources 4.3 X 2.7 X 1.3 In (110 X 70X 33mm)

Laser Sources: 4.3 X 2.7 X 1.8 in (110 X 70 X 46 mm)

**Weight:** 6 oz. (170 g) All specifications are typical at 25 deg. C. Fotec reserves the right to make engineering improvements or manufacturing refinements that may affect product specifications

**Made in USA.** *All specifications are typical at 25 C. Fotec reserves the right to make engineering improvements or manufacturing refinements that may affect product specifications.*

---

For Applications Assistance or Placing Orders:

Call 1-800-537-8254 toll free (US & Canada) 1-781-396-6155 elsewhere

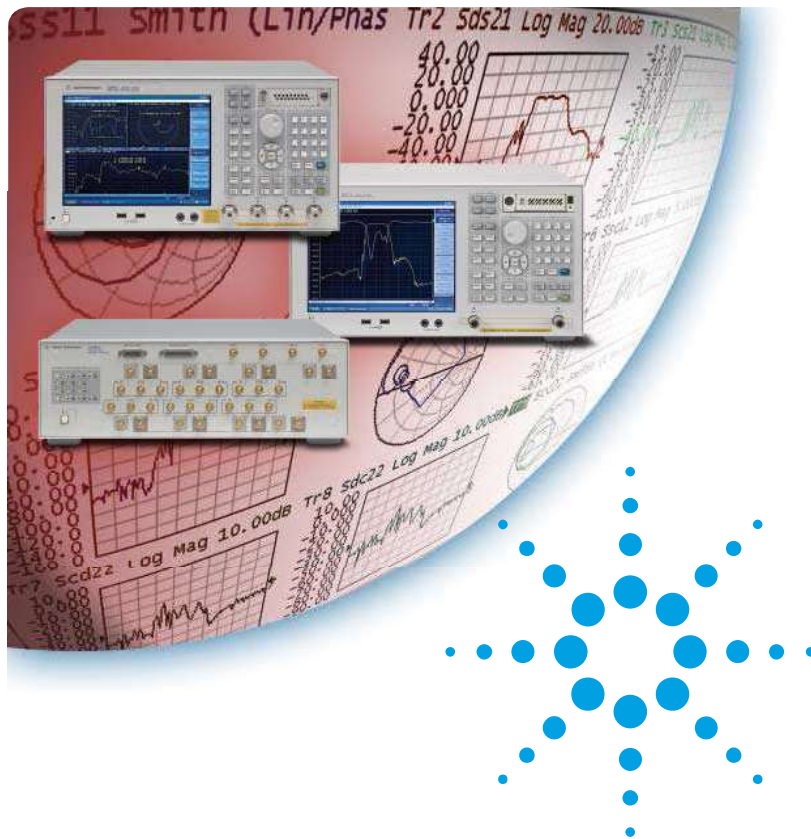
FAX 1-781-396-6395

Send e-mail to [info@fotec.com](mailto:info@fotec.com)

[Request Literature](#) or [Request a Quotation](#)

[Return to the Fotec Home Page](#)





## Agilent E5071C ENA Network Analyzer

**9 kHz to 4.5/6.5/8.5 GHz**

---

**100 kHz to 4.5/6.5/8.5 GHz  
(with bias tees)**

---

**300 kHz to 14/20 GHz  
(with bias tees)**

*The industry standard in  
RF network analysis*



**Agilent Technologies**

## ENA – New Standards in Speed, Accuracy and Versatility

*Agilent's E5071C ENA network analyzers deliver new standards in speed, accuracy and versatility for RF network analysis. Designed with a wide range of measurement capability to meet multiple network analysis needs, the ENA offers efficiency and flexibility for both manufacturing and R&D applications in industries such as wireless communication, automotive, semiconductor, and medical.*

### Key features

- ▶ Wide frequency coverage: 9 kHz to 20 GHz
- ▶ Low trace noise: < 0.004 dB rms at 70 kHz IFBW
- ▶ Wide dynamic range: > 123 dB
- ▶ Fast measurement speed: 9 msec for 401 points with error correction
- ▶ High temperature stability: 0.005 dB/°C
- 2 or 4 ports, plus flexible multiport configuration of up to 22 ports with E5092A
- Built-in VBA programming environment enables high throughput and UI customization
- Powerful analysis and error correction
- Advanced characterization of mixers (such as the vector mixer calibration) and amplifiers with frequency offset mode (optional)
- Advanced characterization of high-speed serial interconnects with enhanced time domain analysis (optional)
- Upgrade are available for all E5071C options at any time



# OptoBERT™ OPB3200

## 3.2Gbps Optical & Electrical Bit-Error-Rate Tester (BERT)



### Overview

The OPTELLENT OptoBERT™ OPB3200 is a cost-effective easy-to-use bit-error-ratio (BER) measurement system for testing components and systems in R&D and manufacturing environments as well as field installations. It incorporates a pattern generator, clock recovery circuits, and a bit-error-ratio analyzer in one compact module that provides both electrical and optical interfaces at data rates up to 3.2Gb/s. The OptoBERT integrated system eliminates the need for additional interface modules to test devices.

The OPB3200 is offered with either preset discrete datarates or with a continuously variable datarate (1kHz step size).

An intuitive graphical user interface (GUI) enables easy point-and-click operation. The GUI displays error counts, BER, and features a unique error-events display for measuring events such as signal interruption due to optical switching.

BER test data from the OptoBERT are output directly into a spreadsheet file without any programming or scripting.

### Applications

- ▶ Production testing of optical transceivers, diplexers/triplexers, and subsystems
- ▶ Production testing of Opto-electronic components and devices TOSA, ROSA, lasers, etc...)
- ▶ Production testing of Gb/s ICs, electronic modules, subsystems, and systems
- ▶ Product development and qualification testing
- ▶ Installation testing and troubleshooting in optical transport networks

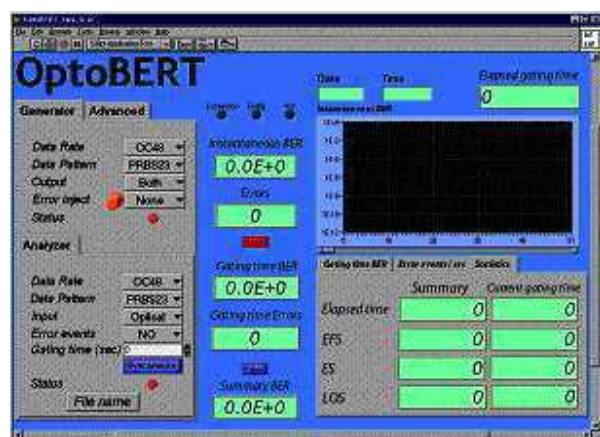
### Key Features

- ▶ Integrated Generator and Analyzer
- ▶ Electrical and optical interfaces
- ▶ Internal Clock & Data Recovery
- ▶ Variable Datarate (1 kHz Step size)
- ▶ Automated Measurement Report
- ▶ Unique Error Events Display
- ▶ Cost-efficient and Easy-to-use

### Test Applications

Telecom	
OC-3	155.52 Mb/s
OC-12	622.08 Mb/s
OC-48	2.48832 Gb/s
OC-48 with FEC	2.66606 Gb/s
Storage	
Fibre Channel	1.0625 Gb/s
Serial-ATA	1.5 Gb/s
2G Fibre Channel	2.125 Gb/s
Serial-ATA2	3 Gb/s
Networking & Computing	
Gigabit Ethernet	1.25 Gb/s
Serial-ATA	1.5 Gb/s
Serial-ATA2	3 Gb/s
RapidIO	1.25 – 3.125G
XAUI	3.125 Gb/s

## Software



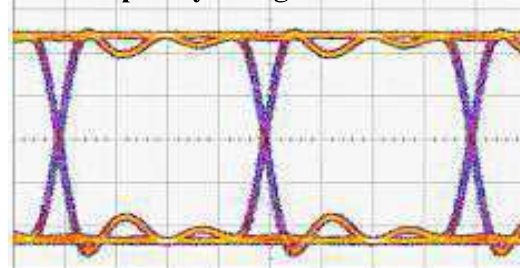
### User Interface

The OptoBERT™ OPB3200 software runs on Windows 98/2000/NT and XP over RS-232 serial interface via an RJ-45 Connector provided on the front panel.

A Serial-to-USB converter can be used if a serial port is not available.

Software drivers are available for incorporating the OptoBERT into test automation suites using programs like C++, LabVIEW, VisualBASIC, and HP VEE.

Output Eye Diagram at OC-48



## Pattern Generator

Parameter	Min	Typ	Max	Units
Output Type	Single-ended or Differential (Optional)			
Data Patterns	• <b>Standard:</b> PRBS 2 <sup>7</sup> -1, 2 <sup>23</sup> -1, 101010 • <b>Optional:</b> CID, K28.5, CJPAT, CRPAT, FDDI, Custom			
Data Rates	• <b>Preset</b> (Standard): OC-3, 12, 48; OC48+ FEC; GbE; FC; 2xFC; XAUI • <b>Custom Preset:</b> (Optional) • <b>Continuously Variable Data Rate</b> (1kHz Step size) (Optional)			
Data Rate Range	155.52		3125	Mb/s
Frequency Accuracy			± 50	ppm
Output Amplitude, Single Ended <sup>(1), (2)</sup>	700	850	1200	mV
Data Rise Time <sup>(3)</sup>		70	90	ps
Data Fall Time <sup>(3)</sup>		70	90	ps
Data Output RMS Jitter <sup>(3)</sup>		4	5.5	ps
Clock Output Amplitude		300		mV
Error Injection	10 <sup>-7</sup> , 10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-9</sup> , single error			
Optical Output	Standard SFP Transceiver Housing			
Connector, Electrical	50 Ω SMA, front panel			
Connector, Optical	LC (SFP)			
<b>Trigger Output</b>				
Output Amplitude	400			mV
Output Type	Single-ended, AC-coupled			
Connector	50 Ω SMA, front panel			

(1) Larger output signal amplitudes up to 1800mV are available as an option

(2) Continuously variable output signal amplitude is available as an option

(3) Measurements based on PRBS $2^{23}-1$  data at OC-48

## Optical Output & Input:

SFP housing is provided as a standard feature. This enables the use of any user-selectable Multi-source Agreement (MSA) compliant SFP transceiver module:

- Single mode (SMF) and multimode fiber (62.5/125um and 50/125um MMF)
- At any wavelength option (850nm, 1310nm, 1490nm, 1550nm, etc...)
- DWDM, CWDM, non-WDM
- P-i-n and APD detectors

## Error Analyzer

Parameter	Min	Typ.	Max	Units
Input Type	Single-ended AC coupled			
Data Patterns	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Standard:</b> PRBS 2<sup>7</sup>-1, 2<sup>23</sup>-1, 101010 (standard)</li> <li>• <b>Optional:</b> CID, K28.5, FDDI</li> </ul>			
Data Rates	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Preset (Standard):</b> OC-3, 12, 48; OC48+ FEC; GbE; FC; 2xFC; XAUI</li> <li>• <b>Custom Preset:</b> (Optional)</li> <li>• <b>Continuously Variable Data Rate</b> (1kHz Step size) (Optional)</li> </ul>			
Data Rate Range	155.52		3125	Mb/s
Electrical Sensitivity <sup>(1)</sup>			50	mV
Electrical Data Input	50		1000	mV
Clocking Mode	Built-in clock recovery			
Pattern Synchronization	Automatic			
Connector, Electrical	50 Ω SMA, front panel			
Connector, Optical	SFP LC (SFP)			

(1): Measurements based on PRBS 2<sup>23</sup>-1 data at 2488.32 Mb/s (OC-48).

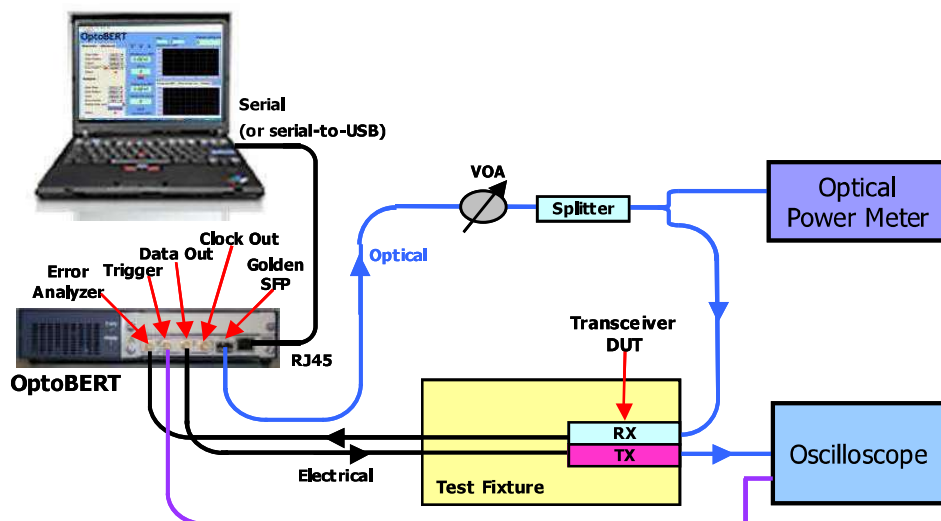
## System & General Specifications

PARAMETER	MIN	MAX	UNIT
Chassis Electrical Voltage	100	240	VAC
Current Drain at Normal Voltage		1.4	A
Operating Temperature Range	5	45	°C
Storage Temperature Range	-40	70	°C
Dimensions (L x W x H)	273x216x45 10.75x8.5x1.75		mm <sup>3</sup> inch <sup>3</sup>
Optical Interface	Standard SFP housing Minimum number of insertion/deinsertion cycles: 200		
Safety	UL, IEC-61010-1		
EMC	EN55011, EN61000-3-2, EN61000-3-3, BS EN61326		
RS 232 PC Interface	RJ-45 connector		
RF Connectors	SMA		
Standard Warranty	2 years		

## Manufacturing Test of Transceiver Modules

Example: Rx: Sensitivity measurement

Tx: Output mask test with oscilloscope



## Ordering Information

OPB3200-X-X-X-X

X: other Custom Options

0: No Optical Transceiver;

1: Optical Transceiver (SFP) 850nm

2: Optical Transceiver (SFP) 1310nm

3: Optical Transceiver (SFP) 1550nm

4: Optical Transceiver (SFP) 1490nm

5: Optical Transceiver (SFP) DWDM with High-sensitivity APD Receiver

S: Single-ended Electrical Output

D: Differential Output

P: Preset Standard Data Rates

C: Custom Data Rates

V: Continuously Variable Data Rate (1kHz Step Size)

### Accessories Included

- User Software
- User Manual
- Power cord
- PC Interface cable

Example: OPB3200-P-S-0: 3.2Gb/s OptoBERT, Preset data rates, Single-ended electrical output, No optical transceiver

## Related Products and Accessories

Model Number	Description
OPB4250	4.25Gb/s OptoBERT
OPB1250	1.25Gb/s OptoBERT
OPG4250	4.25 Gb/s Data Pattern Generator
OPG3200	3.2 Gb/s Data Pattern Generator
OPG1250	1.25 Gb/s Data Pattern Generator
OPS Series	Multichannel Optical Switch for Single Mode and Multimode Fiber
OPR3200	3.2Gb/s Retimed Optical Receiver
OPZ1015	Serial-to-USB Converter
OPZ3004	Additional 1 year Warranty

Specifications are subject to change without notice.

OptoBERT™ is a registered trademark of Optellent, Inc.

© 2007 OPTELLEN Inc.

Rev 3.5

**Optellent Inc.**

Phone: (408) 230-1329

Fax: (408) 228-8976

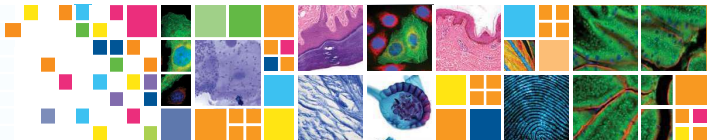
Email: [sales@optellent.com](mailto:sales@optellent.com)

<http://www.optellent.com/>





DIGITAL IMAGING MADE EASY



PRODUCT DATASHEET

# QICAM *FAST1394*

## High-Performance IEEE 1394 FireWire™ Digital CCD Camera

### Monochrome or Color

The QImaging QICAM digital camera is designed for high-resolution, brightfield scientific and industrial applications. A progressive-scan interline CCD sensor gives a resolution of 1.4 million pixels in a 12-bit digital output. High-speed, lownoise electronics provide linear digital data at frame rates up to 110 fps with binning and ROI. The IEEE 1394 FireWire™ digital interface allows ease of use and installation with a single wire. No framegrabber or external power supply is required. The QICAM includes QCapture software (Windows® and Mac OS) for real-time image preview and capture. A Software Development Kit (SDK) is available upon request for interfacing with custom software.

### applications

- Brightfield and Phase-Contrast Microscopy
- Live-Cell Imaging
- Pathology, Histology, & Cytology
- Motility & Motion Analysis
- DNA Analysis
- Metallurgical Microscopy
- Semiconductor Inspection
- Failure Analysis
- Forensic Analysis

## High-Performance Digital CCD Camera



features	benefits
High-Resolution, 1.4-Million-Pixel Sensor	■ Highly detailed, sharp images
High-Speed Readout	■ Previewing & focusing in real time ■ 165fps maximum frame rate ■ 110fps with 4x4 binning & RO ■ 10fps full resolution ■ Ideal for automated imaging applications
Flexible Exposure Control from 12µs to 17.9min	■ Optimal integration over a wide range of light levels
12-Bit Digitization/ 36-Bit Color Digitization	■ 4096 grey levels for precise light-intensity discrimination ■ 4096 levels per channel for superior color images
External Sync & Trigger	■ Tight synchronization with flashlamps, automated filters, shutters, & microscope stage
Peltier Cooling	■ Minimizes thermal noise during low-light imaging
ROI (Region of Interest)	■ Higher frame rates for precise analysis of rapidly changing specimens
Binning	■ Increases sensitivity for quantitation & imaging of very low light levels ■ Increases frame rate
IEEE 1394 FireWire™ QImaging Fast 1394 Technology	■ Simple connectivity ■ Ease of use & installation ■ Portability with laptop computer ■ Simultaneous use of multiple cameras through a single port ■ Single-cable operation (no external power supply or control unit)
Extensive Third-Party Software Support	■ Choose from a large selection of life science & industrial software for microscopy, machine vision, & video-streaming applications

# QICAM Specifications

## ccd sensor

Light-Sensitive Pixels	1.4 million; 1392 x 1040
Binning Modes	2x2, 4x4 8x8
ROI (Region of Interest)	From 1x1 pixels up to full resolution, continuously variable in single-pixel increments
Exposure/Integration Control	12µs to 17.9min in 1µs increments
Sensor Type	Sony® ICX205 progressive-scan interline CCD (monochrome or color)
Pixel Size	4.65µm x 4.65µm
Linear Full Well	10,000e-
Read Noise	12e-
Cooling Available	Yes (optional)
Cooling Type	Peltier thermoelectric cooling to 25°C below ambient
Digital Output	12 bits
Readout Frequency	20, 10, 5, 2.5MHz
Frame Rate	10fps full resolution @ 12 bits (165fps maximum with binning and ROI)

## camera

Computer Platforms/ Operating Systems	Windows® 7, Vista and XP (32/64 bit)
Digital Interface	IEEE 1394 FireWire™
Sustained Data Rate	40MB/s
Shutter Control	Electronic shutter, no moving parts
External Trigger	TTL Input
Trigger Types	Internal, Software, External
External Sync	TTL Input
Gain Control	0.6 to 15x
Offset Control	-2048 to 2047
Optical Interface	1/2", C-mount optical format
Threadmount	1/4" — 20 mount
Power Requirements	6W (non-cooled); 11W (cooled); 8-24V
Weight	635g (non-cooled); 915g (cooled)
Warranty	2 years
Operating Environment	0 to 50°C (32 to 122°F)
Storage Temperature	-10 to 60°C
Humidity	Less than 80% non-condensing at 35°C (95°F)

## camera models

Includes: IEEE 1394 FireWire™ cable, IEEE 1394 PCIe card, QCapture software, and access to SDK

### ■ Monochrome QICAM Cooled

Model: QIC-F-M-12-C

### ■ Monochrome QICAM Non-Cooled

Model: QIC-F-M-12

CCD Digital Camera, 12 Bits

### ■ Color QICAM Cooled

Model: QIC-F-CLR-12-C

### ■ Color QICAM Non-Cooled

Model: QIC-F-CLR-12

CCD Digital Camera, 12 Bits

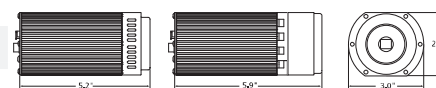
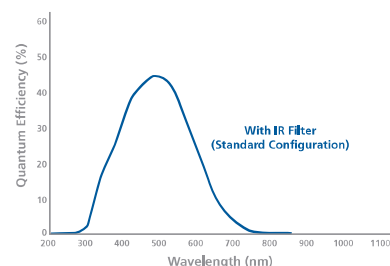
## camera options

- **RGB Color Filter**  
for monochrome cameras (F-mount interface required), refer to data sheet for more details



- **Extended Warranty**

## spectral response



Tel 604.530.5800 ■ Fax 604.539.1825 ■ info@qimaging.com  
www.qimaging.com

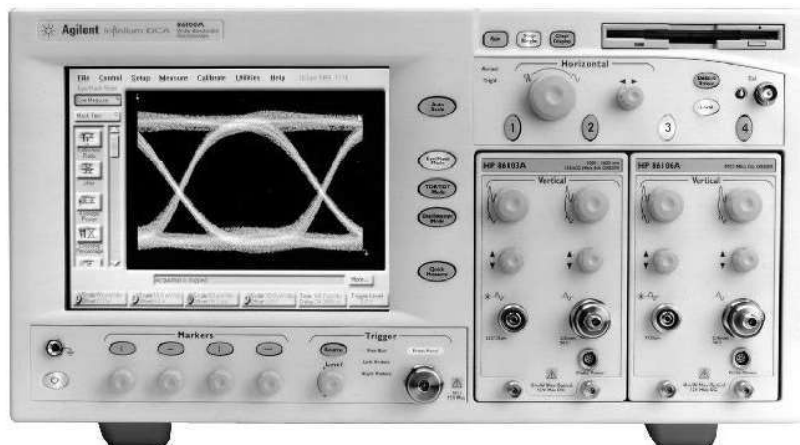
\*Refer to Qimaging website for detailed listing of supported operating systems.  
Note: Specifications are typical and subject to change.

QICAM is a trademark of Qimaging Corporation.  
Qimaging is a registered trademark of Qimaging Corporation.  
Other brand and product names are the trademarks or registered trademarks of their respective owners and manufacturers.

QLQICAM\_DS\_Rev\_A7



- Bandwidth to 50 GHz
- 100 Mb/s to 12.5 Gb/s and beyond
- Built-in compliance tests
- Integrated optical and electrical channels
- Familiar Windows-98 user interface
- Compatible with 83480A series modules



86100A

86100.

### 86100A Infiniium DCA – Wide-Bandwidth Oscilloscope



Agilent 86100A Infiniium DCA was designed to make accurate waveform measurements fast and simple. The Infiniium DCA can be viewed as three instruments in one. It's a general purpose equivalent time sampling oscilloscope, a digital communication analyzer, and time-domain reflectometer. Just select the instrument mode and start making measurements.

#### Familiar Windows-98 User Interface

The Infiniium DCA has an intuitive graphical user interface, so you won't have to spend a lot of time learning or relearning the instrument. Pull-down menus give you easy access to advanced features and icons provide quick access to an extensive set of common tests and measurements. Use the high-performance touchscreen or a mouse to navigate the instrument interface.

The simple, uncluttered front panel has the feel of an analog scope with dedicated scale and position knobs for each vertical channel. Trigger LEDs show you trigger status at a glance. To speed up measurements, you can configure the Quick Measure key for instant access to any four measurements in each instrument mode.

#### Measurement Speed

Measurement speed has been increased with both fast hardware and a friendlier user interface. In the lab, you can't afford to waste time figuring out how to make a measurement, the Infiniium DCA eliminates the relearning curve. In manufacturing, it is a battle to continually reduce cost per test. Infiniium DCA has fast PC-based processors, resulting in high measurement throughput and reduced test time.

#### Smaller Modular Platform

The Infiniium DCA has a large and growing family of plug-in modules designed for a broad range of data rates for optical and electrical waveforms. The Infiniium DCA can hold up to 2 modules for a total of 4 measurement channels. To protect your investment in Agilent's previous platform, all modules from the 83480A and 54750A family are forward compatible with the Infiniium DCA.

The Infiniium DCA is smaller and much lighter than the previous generation wide-bandwidth oscilloscopes. It also uses less than half the power the 83480A and 54750A used.

#### GPIB Code Compatible

The remote programming command set for the Infiniium DCA has been designed to be directly compatible with software written to control the 83480A and 54750A. (Due to improvements and updates in performance, a small set of remote commands may need minor modifications to control the Infiniium DCA.)

#### Compliance Tests

Accurate eye-diagram analysis is essential for characterizing the quality of transmitters used from 100 Mb/s to beyond 12.5 Gb/s. The Agilent Infiniium DCA was designed specifically for the complex task of analyzing digital communications waveforms. Compliance mask and parametric testing no longer require a complicated sequence of setups and configurations. The important measurements you need are right at your fingertips, including:

- Industry standard mask testing with built-in margin analysis
- Extinction ratio measurements with improved accuracy and repeatability
- Automatic eye measurements: crossing %, eye height and width, '1' and '0' levels, jitter, rise or fall times and more.

#### Time Domain Reflectometer (TDR)

TDR measurements are focused on high-speed applications where it is necessary to optimize electrical system components, such as microstrip lines, PC board traces, SMA edge launchers and coaxial cables where imperfections cause signal distortion and reflections. Signal integrity is a critical requirement in high-speed digital signal transmission.

#### Built-in Information System

Infiniium DCA's built-in information system puts measurement assistance at your fingertips. You'll no longer have to look for the manual when you need help setting up the DCA or making complex measurements. A set-up guide gives you step-by-step instructions for many measurements and procedures. Links on the measurement screen take you directly to the information you need in the on-line manual.

#### Internal Hard and Floppy Disk Drives

Use the internal 3 GB hard drive or the 3.5 inch, 120 MB SuperDisk floppy disk drive to store instrument setups, waveforms, or screen images. Screen images can be stored in many standard industry file formats. LAN access is supported for network access and file sharing.

#### Gated Triggering

Rear panel trigger gating port allows easy external control of data acquisition for circulating loop or burst-data experiments. Use TTL-compatible signals to control when the instrument does and does not acquire data.

#### Stimulus Response Testing Using the 86130A BitAlyzer

Error performance analysis represents an essential part of digital transmission test. The Infiniium DCA and 86130A BitAlyzer error performance analyzer come together to create a powerful test solution where two instruments together can perform measurements that would not be possible. For more information on the 86130A BitAlyzer see page 406.

# Oscilloscopes

122

## Digital Communications Analyzer (cont.)

DA  
eries



86100A with plug-in modules

### Modules for the 86100A Infiniium DCA

The Infiniium DCA has a large family of plug-in modules designed for a broad range of data rates for optical and electrical waveforms. The Infiniium DCA can hold up to 2 modules for a total of 4 measurement channels. All optical measurement plug-in modules also have a dual bandwidth electrical channel.

The Agilent 86101A and 86103A modules incorporate an optical channel with over 2.85 GHz of bandwidth and a 20 GHz electrical channel. The electrical channel has both a 20 GHz mode for better waveform fidelity, and a 12.4 GHz mode for optimum noise performance. The calibrated, integrated optical channel has over 2.85 GHz bandwidth for easy, precise single-mode and multimode optical measurements. The 86101A and 86103A utilize switchable reference filters for transceiver compliance testing at OC-3, OC-12, OC-48, Fibre Channel, 1063, and Gigabit Ethernet 1250 data rates. The 86101A operates over the 750 nm to 860 nm wavelength range, and the 86103A operates over the 980 nm to 1625 nm wavelength range.

The 86105A module incorporates a single-mode optical channel with over 20 GHz of bandwidth and a 20 GHz electrical channel. The electrical channel has both a 20 GHz mode for better waveform fidelity, and a 12.4 GHz mode for optimum noise performance. The 86105A utilizes switchable reference filters for transceiver compliance testing at OC-3, OC-12, OC-48, and OC-192 data rates.

The 86106A module incorporates a 10 Gb/s optical reference receiver and a 40 GHz electrical channel. The electrical channel also has a reduced bandwidth setting of 18 GHz for improved noise performance. It includes a reference receiver path for 10 Gb/s transmitter test that has been designed to meet OC-192/STM-64 standards.

The 86109A module incorporates a 30 GHz optical measurement channel and a 40 GHz electrical channel. The electrical channel has a reduced bandwidth setting of 18 GHz for improved noise performance. The optical channel frequency response is designed to minimize distortion of the displayed optical pulse and does not include any provision for switching a SDH/SONET filter into the channel.

The 86112A electrical module provides two measurement channels with user selectable bandwidths. The 12.4 GHz bandwidth mode provides better noise performance for accurate measurement of small signals. The 20 GHz bandwidth mode provides high fidelity display and measurement of very high speed waveforms.

The 83484A electrical module provides two measurement channels with user selectable bandwidths. The 26.5 GHz bandwidth mode provides better noise performance for accurate measurement of small signals, and 50 GHz bandwidth mode provides higher fidelity for very high speed waveforms.

The 54753A is a two channel electrical plug-in with a TDR step generator built into channel one. The TDR channel has 18 GHz of bandwidth while the second channel has 20 GHz of bandwidth. The 54754A is a differential TDR with two channels, each of which have a built-in step generator and 18 GHz of bandwidth.

The 8349XA series of clock recovery modules provide a recovered clock and recovered data output, and the ability to trigger on data for slower rates. The 83491A accepts electrical inputs, the 83492A accepts multimode fiber inputs, and the 83493A accepts single mode fiber inputs. The new 83494A clock recovery module provides clock recovery for both 2.488 and 9.953Gb/s testing. All four clock recovery modules support standard telecom and/or enterprise data rates.

Plug-in Module	Electrical Channels		Optical Channel					
	Number	Bandwidth GHz	Fiber Input	Wavelength	Unfiltered Bandwidth GHz (typical)	Filters	Filter Rates Mb/s	Mask Test Sensitivity (Characteristic)
<b>83484A</b>	2	26.5/50						
<b>86101A</b> (83487A)	1	12/20	62.5/125 um	750–860 nm	2.85 (>3.0)	2 or 3	155, 622, 1063, 1250, 1563, 2125, 2488	(–17 dBm)
<b>86103A</b> (83486A)	1	12/20	62.5/125 um	980–1625 nm	2.85 (>3.0)	2 or 3	155, 622, 1063, 1250, 2125, 2488	(–20 dBm)
<b>86105A</b> (83485A)	1	12/20	9/125 um	980–1625 nm	20	1, 2 or 3	155, 622, 2488, 3125, 9953	(–10 dBm)
<b>86106A</b> (83485B)	1	18/40	9/125 um	980–1625 nm		1	9953	(–8 dBm)
<b>86109A</b> (83482A)	1	18 & 40	9/125 um	980–1625 nm	30			
<b>86112A</b> (83483A)	2	12 & 20						
<b>54753A</b>	1 TDR/ Elec. & 1 Elec.	12/18 and 12/20						
<b>54754A</b>	2 TDR/ Elec.	12/18						
Clock Recovery	Operating Input Power Level for Clock Recovery		Insertion Loss		Data Rates for Clock recovery		Tracking/ Acquisition Range	
	Input							Module Contributed Jitter (Characteristic)
<b>83491A</b>	50 Ohm Electrical	–10 to +3 dBm	DC-2500 MHz: 7 dB 4500 MHz: 10 dB		155, 622, 1060, 1250, 2125, 2488, 2500 Mb/s		±0.1%	<0.0125 UI RMS (<0.01 UI RMS)
<b>83492A</b>	62.5/125 um	750–860 nm: –10 to +3 dBm 1000–1600 nm: –13 to +3 dBm	≤5.0 dBm max		155, 622, 1060, 1250, 2125, 2488, 2500 Mb/s		±0.1%	<0.0125 UI RMS (<0.01 UI RMS)
<b>83493A</b>	9/125 um	1000–1600 nm: –20 to +3 dBm	≤1.5 dBm max		155, 622, 1250, 2488, 2500 Mb/s		±0.1%	<0.0125 UI RMS (<0.01 UI RMS)
<b>82494A</b>	9/125 um	1000–1600 nm: –10 to +3 dBm	≤1.5 dBm max		2488 and 9953 Mb/s			

© Keysight Technologies

Reproduced with Permission, Courtesy of Keysight Technologies